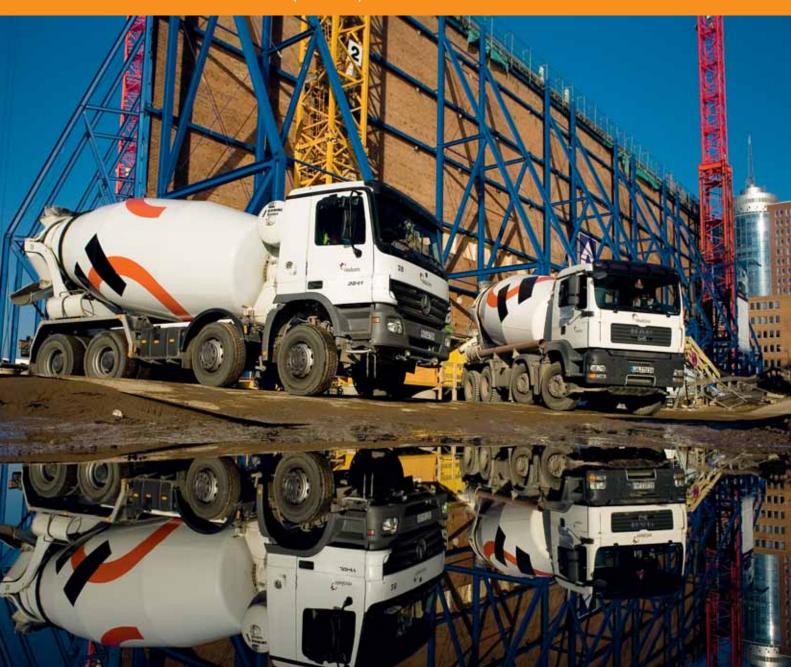


BetonpraxisDer Weg zu dauerhaftem Beton

Eine Publikation der Holcim (Deutschland) AG



Inhaltsverzeichnis

1.	Die Ausgangsstoffe zur Betonherstellung	
1.1	Zemente	3
1.2	Wasser	16
1.3	Gesteinskörnung	18
1.4	Zusatzmittel	31
1.5	Zusatzstoffe	36
2.	Vom Frischbeton zum Festbeton	
2.1	Zusammensetzung des Betons	42
2.2	Einteilung des Betons	47
2.3	Überwachungsklassen	58
2.4	Verarbeitbarkeit und Konsistenz	60
2.5	Herstellung und Transport	62
2.6	Einbringen und Verdichten	65
2.7	Nachbehandlung	67
2.8	Betonieren bei warmer Witterung	71
2.9	Betonieren bei kalter Witterung	75
2.10	Pumpfähiger Beton	77
2.11	Leichtverdichtbarer Beton	79
2.12	Selbstverdichtender Beton	83
2.13	Stahlfaserbeton	87
2.14	Beton für wasserundurchlässige Bauwerke	90
2.15	Hochfester Beton	92
2.16	Sichtbeton	94
2.17	Beton für Industrieböden	102
2.18	Spritzbeton	107
3.	Ursachen und Vermeidung von Betonschäde	n
3.1	Entmischung des Betons	111
3.2	Rissbildung und Schwinden	112
3.3	Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion	119
3.4	Ausblühungen	121
3.5	Angriff durch Frost und Taumittel	123
3.6	Angriff durch chemische Stoffe	126
3.7	Angriff durch Sulfate	128
3.8	Alkali-Kieselsäure-Reaktion	129
3.9	Feuerbeständigkeit	131
	Erläuterungen zur ZTV-ING	133
	Literaturhinweise	136
	Normen/Richtlinien/Empfehlungen	138

Copyright by Holcim (Deutschland) AG

Verfasser: Technical Marketing Holcim (Deutschland) AG

2. Auflage 2009

Verkaufspreis:

€ 50,-

Einleitung

Mit der «Betonpraxis» will die Holcim (Deutschland) AG zu jedem Schritt der Betonherstellung und Verarbeitung Tipps aus der Praxis für die Praxis geben.

Was aus der alltäglichen Arbeit auf Baustellen hervorgegangen ist und oft nur mündlich weitergegeben wurde, findet sich in der «Betonpraxis» schriftlich und in leicht zugänglicher Form. Selbstverständlich berücksichtigt die «Betonpraxis» die aktuellen deutschen und europäischen Regelwerke, zusätzlich enthält sie nützliche Literaturhinweise.

Die inhaltliche und redaktionelle Bearbeitung der «Betonpraxis» erfolgte durch das Technical Marketing der Holcim (Deutschland) AG. Gerne stehen wir Ihnen auch für eine individuelle Beratung zur Verfügung.





Allgemeines

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel. Darunter versteht man einen Stoff, der nach dem Mischen mit Wasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärtet. Der sich dabei bildende Zementstein ist wasserbeständig und weist eine hohe Festigkeit auf. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Zementarten. Die europäischen und nationalen Regelwerke unterscheiden zwischen Normalzementen, Normalzementen mit besonderen Eigenschaften und Sonderzementen. Zusammensetzung, Anforderungen und Eigenschaften der Normalzemente sind in der europäischen Norm DIN EN 197-1 geregelt. Für Normalzemente mit besonderen Eigenschaften gilt DIN 1164 Teile 10-12. DIN EN 14216 behandelt die Gruppe der Sonderzemente, die in Deutschland bisher jedoch nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt.

Aus ökologischen, ökonomischen und betontechnologischen Gründen werden in Deutschland zunehmend Portlandkomposit- und Hochofenzemente verwendet. Diese enthalten neben Portlandzementklinker weitere Hauptbestandteile wie z.B. Hüttensand oder Kalksteinmehl. Der verstärkte Einsatz von Klinkersubstituten bringt verschiedene Vorteile. Dem Zementhersteller hilft es, natürliche Rohstoffreserven zu schonen und die Kohlendioxid (CO₂) -Emissionen bei der Zementherstellung deutlich zu reduzieren. Der Anwender kann durch den Einsatz von CEM II- und CEM III-Zementen bestimmte Betoneigenschaften, wie z.B. Verarbeitbarkeit, Wärmeentwicklung, Dauerhaftigkeit usw. verbessern.

Geschichtliches

Bereits im Altertum benutzten die Römer hydraulisch erhärtende Mörtel. Sie brannten tonhaltigen Kalk und versetzten ihn mit Puzzolanerde oder Ziegelmehl. Zusammen mit geeigneten Gesteinskörnungen entstand daraus «Opus Caementitium», der römische Beton, der als Vorläufer unseres Betons gilt und dem Zement seinen Namen gab.

Der Engländer J. Aspdin führte um 1824 eine Feinaufbereitung der Rohstoffe Kalkstein und Ton ein und erzeugte durch Brennen ein dem Zement vergleichbares Produkt. Wegen der Ähnlichkeit des daraus hergestellten Betons zum Portlandstein (dauerhafter Kalkstein der Insel Portland), den man in England häufig für Bauzwecke verwendete, wurde dieses Produkt als Portlandzement bezeichnet.

Zemente

Abb. 1.1.1 Schwere Abbaumaschinen im Steinbruch



Abb. 1.1.2
Walzenschüsselmühle zum Feinmahlen des
Rohgesteins



Abb. 1.1.3 Drehrohrofen, das Herzstück eines Zementwerks



Abb. 1.1.4 Kugelmühle zum Feinmahlen des Klinkers mit Gipsstein und Zusatzstoffen zu Zement

Herstellung

Die Herstellung von Portlandzement erfolgt aus Rohstoffen, die bezüglich ihrer Zusammensetzung und Korngröße aufbereitet, bis zum Sintern gebrannt und anschließend zu reaktionsfähigem Zementpulver vermahlen werden. Grundsätzlich können bei der Herstellung von Zement vier Produktionsstufen unterschieden werden.

Abbau und Brechen des Rohgesteins

Für eine Tonne Portlandzement benötigt man gut anderthalb Tonnen Rohgestein in Form von Kalkstein, Mergel oder Ton, da während des Brennens Kohlendioxid und Wasser aus dem Rohgestein ausgetrieben werden. Bereits im Steinbruch (Abb. 1.1.1) wird das Rohgestein im Brecher auf Faustgröße vorzerkleinert.

Mischen und Mahlen der Rohmaterialien zu Rohmehl

Beim nächsten Verfahrensschritt erfolgt das Zusammenfügen verschiedener Rohmaterialkomponenten, um die richtige chemische Zusammensetzung zu erreichen. In Kugel- oder Walzenschüsselmühlen (Abb. 1.1.2) wird das Gestein weiter zerkleinert und gleichzeitig getrocknet. Es verlässt die Mühle als feines Rohmehl, das in großen Homogenisierungssilos weiter vergleichmäßigt wird.

Brennen des Rohmehls zu Klinker

Der Brennprozess bei rund 1450°C (Sintertemperatur) ist ein zentraler Schritt bei der Zementherstellung. Bevor das Rohmehl in den Drehrohrofen (Abb. 1.1.3) eingeleitet wird, durchströmt es den Wärmetauscherturm und wird dabei auf fast 1000°C vorgewärmt. Als glühender Klinker verlässt das Brenngut den Ofen und wird anschließend rasch mit Luft abgekühlt. Als Brennstoffe werden Kohle, Öl, Erdgas und vermehrt auch Alternativbrennstoffe wie z.B. Altreifen oder Trockenklärschlamm eingesetzt.

Mahlen des Klinkers mit Gipsstein und Zusatzstoffen zu Zement

Damit aus dem Klinker ein reaktionsfähiges Produkt entsteht, wird er in einer Mahlanlage (Abb. 1.1.4) zusammen mit wenig Gipsstein als Erstarrungsregler gemahlen. Die Mahlfeinheit steuert die Festigkeitsentwicklung des Zements maßgeblich. Je nach Zementart wird beim Mahlen Klinker durch mineralische Zumahlstoffe (Hüttensand, Steinkohlenflugasche, Silicastaub, Kalkstein siehe Kap. 1.5) ergänzt, wobei so genannte Portlandkompositund Hochofenzemente entstehen.

Vorgemahlene Zemente und Zusatzstoffe können auch in Mischanlagen zu Zementen mit speziellen Eigenschaften gemischt werden. In Intensivmischern werden die Komponenten vollständig gemischt und homogenisiert. Mischanlagen bieten den Vorteil hoher Flexibilität: Kurzfristig können Kleinst- bis Großmengen «just in time» produziert und auf spezielle Kundenwünsche abgestimmt werden (Abb. 1.1.5).



Abb. 1.1.5 Mischanlage für Zemente nach Maß

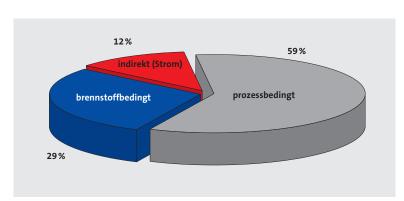
CO2-Emissionen bei der Zementherstellung

Die Herstellung von Zement ist ein energie- und rohstoffintensiver Prozess und wie auch bei anderen Produkten mit der Emission von Kohlendioxid ($\mathrm{CO_2}$) verbunden. Der Energieaufwand für die Zementproduktion ist erheblich, dennoch entsteht der weitaus größte Anteil der $\mathrm{CO_2}$ -Emissionen nicht durch den Einsatz von Brennstoffen oder indirekt durch Stromverbrauch sondern ist prozessbedingt (Abb. 1.1.6). Bei der thermischen Umwandlung von Kalkstein und Ton zu Zementklinker wird $\mathrm{CO_2}$ freigesetzt:

 $CaCO_3 + Energie = CaO + CO_2$

Die Holcim (Deutschland) AG hat in den vergangenen Jahren den Brennstoffenergiebedarf für die Zementherstellung deutlich gesenkt und dabei ein verfahrenstechnisches Optimum nahezu erreicht. Darüber hinaus setzt die Holcim (Deutschland) AG seit Oktober 2007 nur noch regenerativ erzeugten Strom ein. Die Möglichkeiten auf diesen Wegen $\mathrm{CO_2}\textsc{-}\mathrm{Emissionen}$ einzusparen sind daher nahezu ausgeschöpft.

Das weitaus größte Potential CO_2 -Emissionen zu vermeiden bietet die Herstellung von Zementen, bei denen ein Teil des Zementklinkers durch eine CO_2 -neutrale Komponente ersetzt wird. Latenthydraulischer Hüttensand ist in besonderer Weise als Klinkerersatzstoff geeignet (siehe Kap. Hüttensandhaltige Zemente). Hüttensandhaltige Zemente sind hochwertige Zemente, bei deren Herstellung deutlich weniger CO_2 emittiert wird als bei der von reinem Portlandzement. Je höher der Hüttensandanteil des Zementes ist, desto geringer sind seine herstellungsbedingten CO_2 -Emissionen (siehe Abb. 1.1.7). Darüber hinaus hilft die Verwendung von Hüttensand die natürlichen Ressourcen zu schonen.



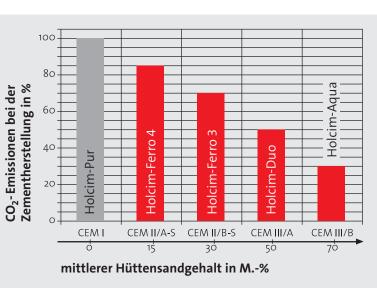


Abb. 1.1.6 Quellen für CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Portlandzement

Abb. 1.1.7 Herstellungsbedingte CO₂ -Emissionen unterschiedlicher Zementtypen

Zemente

Für die Holcim (Deutschland) AG ist der verantwortungsbewusste Umgang mit natürlichen Ressourcen zentraler Bestandteil der Unternehmenspolitik. Frühzeitig wurden die Weichen gestellt und die Entwicklung und Herstellung hüttensandhaltiger Zemente vorangetrieben.

Abb. 1.1.8
Windkraftanlage
bei Emden mit
einem Betonvolumen von 2000 m³.
Einsparung von
ca. 300 t CO₂ durch
die Verwendung
von Holcim-Duo 4.



Abb. 1.1.9 Holcim-Umweltsiegel für umweltfreundlich hergestellte hüttensandhaltige Zemente

*Die hüttensandhaltigen Zemente der Holcim (Deutschland) AG verursachen bei ihrer Herstellung bis zu 70% weniger CO₂-Emissionen als Portlandzement.

PAJO CO2-Emission

zolcim-Umwelis,

Abb. 1.1.10 Umweltfreundlicher Transport von Hüttensand mit Binnenschiffen







Hüttensandhaltige Zemente

Hüttensand ist ein altbewährter, qualitativ gleichwertiger und ökologisch sinnvoller Ersatz für Zementklinker. Seine klinkerähnlichen Eigenschaften erlauben wie bei keinem anderen Stoff die Herstellung von hochwertigen Zementen mit einem Klinkeraustauschgrad von bis zu 95 %. Die Nutzung von Hüttensand trägt somit in besonderer Weise dazu bei, natürliche Ressourcen zu schonen und CO₂-Emissionen zu vermindern. Portlandhüttenzemente und Hochofenzemente sind energieeffizient hergestellte zukunftsorientierte Produkte, die gegenüber reinen Portlandzementen immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Hüttensand ist ein hochwertiges Nebenprodukt der Roheisenerzeugung und wird durch Granulation von Hochofenschlacke gewonnen (Abb. 1.1.12). Hierbei wird die flüssige Schlacke durch Eindüsen von Wasser abgeschreckt, so dass eine feine Körnung entsteht (Abb. 1.1.11). Auf Grund seines glasartigen, nicht kristallinen Zustandes besitzt Hüttensand latent hydraulische Reaktivität, sehr ähnlich der des Portlandzementklinkers. Hüttensandhaltige Zemente haben eine lange Tradition. Eisenportlandzement (heute Portlandhüttenzement) ist bereits seit 1909 ein genormtes Produkt, Hochofenzement seit 1917.

Die Verwendung von Hüttensand ist jedoch nicht nur aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht interessant, sie bietet darüber hinaus betontechnologisch nutzbare Aspekte. So können gezielt Zemente mit speziellen Leistungsmerkmalen hergestellt werden.

Vorteilhafte Eigenschaften von hüttensandhaltigen Zementen:

- Geringe herstellungsbedingte CO₂-Emissionen
- Günstige Verarbeitungseigenschaften
- Längere Verarbeitungszeiten
- Niedrige Wärmeentwicklung und verminderte Rissbildung aufgrund von Temperaturspannungen
- Hohes Nacherhärtungspotential
- Ausbildung eines dichten Gefüges
- Hohe Dauerhaftigkeit
- Geringe Ausblühneigung
- Geringer wirksamer Alkaligehalt der Hüttensandkomponente
- Helle Betonoberfläche

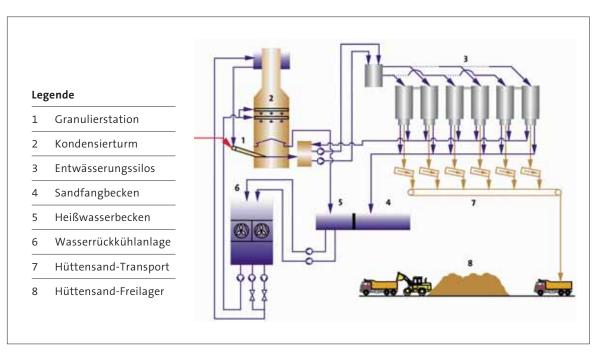


Abb. 1.1.12
Schema Hüttensanderzeugung
am Beispiel der
Granulationsanlage
der Holcim (Deutschland) AG am Hochofen B im Stahlwerk
Salzgitter

Zemente

Abb. 1.1.13 Zusammensetzung der Zemente gemäß DIN EN 197-1 und DIN EN 14216

								Hau	ıptbest	andteil	e ¹⁾				
	Hauptzementarten	Benennung	Kurzbezeichnung	Holcim Zementsorte	Portland-zementklinker	السلام Hüttensand	Silicastaub	Puzzolane natürlich	Puzzolane natürlich getempert	Flugasche kieselsäurereich	Flugasche kalkreich	Gebrannter Schiefer	.: : :	. Манкусени П	Nebenbestandteile ^{1) 4)}
	CEMI	Portland-	CEMI	Pur	K	3	U-1	r	Q	V	VV	'	-	LL	~
	CLIVIT	zement	CLIVII	Sulfo	95–100										0–5
	CEM II	Portland-	CEM II/A-S	Ferro	80–94	6–20									0-5
		hütten- zement	CEM II/B-S	Ferro	65-79	21-35									0-5
		Portlandsilica- staubzement	CEM II/A-D		90–94		6–10								0-5
		Portland-	CEM II/A-P		80–94			6–20							0-5
		puzzolan- zement	CEM II/B-P	Trass	65–79			21–35							0-5
			CEM II/A-Q		80–94				6–20						0-5
			CEM II/B-Q		65–79				21–35						0-5
ᅻ		Portland-	CEM II/A-V		80–94					6–20					0-5
197		flugasche- zement	CEM II/B-V		65-79					21-35					0-5
H			CEM II/A-W		80–94						6-20				0-5
			CEM II/B-W		65–79						21-35				0-5
nach		Portland-	CEM II/A-T		80–94							6–20			0-5
Normalzemente nach DIN EN 197-1		schiefer- zement	CEM II/B-T		65-79							21–35			0-5
eme		Portland-	CEM II/A-L		80–94								6–20		0-5
nalze		kalkstein- zement	CEM II/B-L		65–79								21–35		0-5
lorn			CEM II/A-LL		80–94									6-20	0-5
~			CEM II/B-LL		65–79									21-35	0-5
		Portland-	CEM II/A-M		80–94					6–20					0-5
		komposit- zement ³⁾	CEM II/B-M		65-79					21–35					0-5
	CEM III	Hochofen-	CEM III/A	Duo	35–64	36–65									0-5
		zement	CEM III/B	Aqua	20-34	66–80									0-5
			CEM III/C		5–19	81–95									0-5
	CEM IV	Puzzolan-	CEM IV/A		65–89				11-35						0-5
		zement 3)	CEM IV/B		45-64				36–55						0-5
	CEM V	Komposit-	CEM V/A		40-64	18-30			18-30						0-5
		zement 3)	CEM V/B		20–38	31–50			31–50						0-5
L	VLH III	Hochofen-	VLH III/B		20-34	66–80									0-5
Sonderzemente nach DIN EN 14216		zement	VLH III/C		5–19	81–95									0-5
nent 142	VLH IV	Puzzolan-	VLH IV/A		65–89						11-35				0-5
rzen		zement 3)	VLH IV/B		45-64						36–55				0-5
nde	VLH V	Komposit-	VLH V/A		40-64	18-30			18-30						0-5
20		zement 5)	VLH V/B		20-38	31–50			31–50						0-5

Die Werte (in Massen-%) der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile, d.h. ohne Calciumsulfat oder Zementzusatzmittel.
 Der Anteil an Silicastaub ist auf 10% begrenzt.
 In den Portlandkompositzementen CEM II/A-M und CEM II/B-M, in den Puzzolanzementen CEM IV/B und in den Kompositzementen CEM V/A und

CEM V/B müssen die Hauptbestandteile neben dem Portlandzementklinker des Zements angegeben werden.

Stoffe, die als Nebenbestandteile neben dem Portlandzementklinker des Zements angegeben werden.

In den Puzzolanzementen VLH IV/A und VLH IV/B und den Kompositzementen VLH V/A und VLH V/B müssen die Hauptbestandteile neben Klinker durch die Bezeichnung des Zementes angegeben werden.

Zementarten und geltende Normen

Die Norm DIN EN 197-1 legt die Anforderungen an die Familie der Normalzemente fest. Sie unterscheidet 27 Zemente, die in die fünf Hauptzementarten CEM I bis CEM IV unterteilt sind. Für die Familie der

VLH Sonderzemente mit besonders niedriger Hydratationswärme gilt DIN EN 14216 (Abb. 1.1.13). Weiterhin gibt es Normalzemente mit besonderen Eigenschaften. Hierfür gelten die Normen DIN 1164-10/11/12 bzw. die DIN EN 197-1 (Abb. 1.1.14)

Abb. 1.1.14 Besondere Zementeigenschaften DIN 1164-10/11/12 und DIN EN 197-1

Besondere Eigenschaften	Kennz.	Norm	Zementart	Anforder	ung	
niedrige Hydratationswärme LH		DIN EN 197-1	CEM I bis CEM IV	Hydratationswärme ≤ 270 J/g		
hoher Sulfatwiderstand	HS	DIN EN 1164-10	CEMI	C ₃ A≤ 3M.	-% und Al ₂ O ₃ ≤ 5M%	
			CEM III/B und CEM III/C	Hüttensa	ndgehalt ≥ 66 M%	
			CEM I, CEM II (außer CEM II/B-S),CEM IV und CEM V	≤ 0,60		
niedrig wirksamer	NA	DIN EN 1164-10	CEM II/B-S	≤ 0,70	M% Na₂O-Äquivalent	
Alkaligehalt	IVA		CEM III/A Hüttensandgehalt ≤ 49M%	≤ 0,95	M. 70 Na ₂ O Aquivalent	
			CEM III/A Hüttensandgehalt ≥ 50M%	≤ 1,10		
			CEM III/B und CEM III/C	≤ 2,00		
			CEM I bis CEM V 32,5 N/R	Erstarrun	gsbeginn ≥ 15 min und < 75 min	
frühes Erstarren	FE	DIN EN 1164-11	CEM I bis CEM V 42,5 N/R	Erstarrun	gsbeginn ≥ 15 min und < 60 min	
			CEM I bis CEM V 52,5 N/R	Erstarrun	gsbeginn ≥ 15 min und < 45 min	
schnell erstarrend	SE	DIN EN 1164-11	CEM I bis CEM V	Erstarrun	gsbeginn ≤ 45 min	
erhöhter Anteil an						
organischen Zusätzen	НО	DIN EN 1164-12	CEM I bis CEM V	Anteil Zu:	sätze ≤ 1 M%	

		Fueta www.				
Festigkeits- klasse -	Anfangs	festigkeit	Normfe	 Erstarrungs- beginn ³⁾ 		
Kiasse	2 Tage	7 Tage	28 1	Гаge	[Min.]	
22,5 4)			≥ 22,5	≤ 42,5	≥ 75	
32,5 L ⁵⁾		≥ 12				
32,5 N		≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	
32,5 R	≥ 10,0					
42,5 L ⁵⁾		≥ 16				
42,5	≥ 10,0		≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0					
52,5 L ⁵⁾	≥ 10,0	·				
52,5 N	≥ 20,0		≥ 52,5		≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0					

¹⁾ Prüfung nach DIN EN 196-1 2) 1 MPa entspricht 1 N/mm²

5) nur bei Hochofenzementen mit niedriger Anfangsfestigkeit nach DIN EN 197-4

Mechanische und physikalische Anforderungen

Wichtiges Kriterium für die Kennzeichnung von Zementen ist die Einteilung in Festigkeitsklassen. Hierfür werden sowohl die Normfestigkeiten nach 28 Tagen als auch die Anfangsfestigkeiten berücksichtigt. Für jede Klasse der Normfestigkeit 32,5, 42,5 und 52,5 sind nach DIN EN 197 drei Klassen für die Anfangsfestigkeit definiert: eine Klasse L mit niedriger Anfangsfestigkeit, die Klasse N mit normaler und die Klasse R mit hoher Anfangsfestigkeit. DIN EN 14216 kennt darüber hinaus die Festigkeitsklasse 22,5 (Abb. 1.1.15).

Für die einzelnen Festigkeitsklassen sind auch die Zeiten für den Erstarrungsbeginn festgelegt (Abb. 1.1.15).

Abb. 1.1.15

Zementfestigkeitsklassen gemäß DIN EN 197-1/4 und **DIN EN 14216**

³⁾ Prüfung nach DIN EN 196-3 4) nur bei Sonderzementen nach DIN 14216

Zemente

Normbezeichnungen von Zementen

In DIN EN 197-1 bzw. DIN 1164 sind die Normbezeichnungen für Zemente geregelt. Abb. 1.1.16 zeigt Beispiele zur Systematik und Deutung der Bezeichnungen.

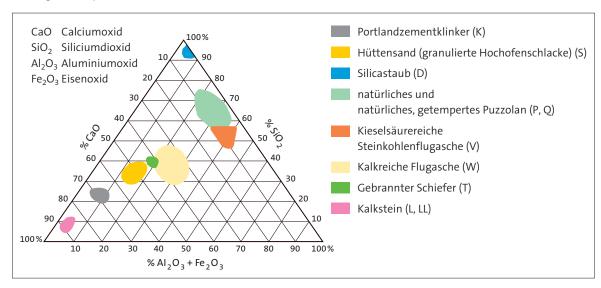
CEM	I	42,5	R				
Zement gemäß DIN EN 197-1	Zementart Typ I (Portland- zement)	Festigkeits- klasse 42,5	hohe Anfangs- festigkeit				
CEM	II ,	/ A -	- S	42,5	R		
Zement gemäß DIN EN 197-1	Zementart Typ II (Portlandkom- positzement)	enthält 6–20% Zusatzstoff	Zusatzstoff ist hochwertiger Hüttensand	Festigkeits- klasse 42,5	hohe Anfangs- festigkeit		
CEM	II ,	/ B -	- Р	42,5	R		
Zement gemäß DIN EN 197-1	Zementart Typ II (Portlandkom- positzement)	enthält 21–35% Zusatzstoff	Zusatzstoff ist natürliches Puzzolan (z.B. Trass)	Festigkeits- klasse 42,5	hohe Anfangs- festigkeit		
CEM	III ,	/ A	42,5	N	NA		
Zement gemäß DIN EN 197-1	Zementart Typ III (Hochofen- zement)	enthält 36-65 % Hüttensand als Zusatzstoff	Festigkeits- klasse 42,5	normale Anfangs- festigkeit	niedriger wirksamer Alkaligehalt		
CEM	III ,	/ В	32,5	N -	- LH /	HS /	NA
Zement gemäß DIN EN 197-1	Zementart Typ III (Hochofen- zement)	enthält 66–80% Hüttensand als Zusatzstoff	Festigkeits- klasse 32,5	normale Anfangs- festigkeit	niedrige Hydratations- wärme	hoher Sulfat- widerstand	niedriger wirksamer Alkaligehalt

Abb. 1.1.16 Beispiele zur Bedeutung der Bezeichnungen

Stoffliche Zusammensetzung der Hauptbestandteile von Zement

Abb. 1.1.17 zeigt – bezogen auf die wichtigen Hauptoxide CaO, SiO_2 und $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ – die stoffliche Zusammensetzung der Hauptbestandteile von Zement.

Abb. 1.1.17 Dreistoffdiagramm CaO / SiO₂ / Al₂O₃ + Fe₂O₃



Prüfung von Zementqualität und Normkonformität

Ein dreigliedriges Qualitätsmanagementsystem garantiert Qualität und Normkonformität der Holcim Zemente:

- interne Überwachungsprüfung (Eigenüberwachung)
- funktionsfähiges und zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem
- Fremdüberwachung.

Werkseigene Qualitätskontrolle

Bei allen Produktionsschritten der Zementherstellung, vom Steinbruch bis zum Zementversand, werden Materialproben entnommen und analysiert. Eine lückenlose Produktionsüberwachung sichert eine gleichmäßig hohe Zementqualität. Durch statistische Auswertung der Prüfresultate von den Zementversandproben muss der Nachweis der Normerfüllung nach DIN EN 197-1 laufend erbracht werden. Die DIN EN 196 beschreibt die Prüfverfahren für Zement und die DIN EN 197-2 die Konformitätsbewertung.

Qualitätsmanagementsystem

Unsere Zementwerke haben ein Qualitätsmanagementsystem aufgebaut und sind nach der Normenserie ISO 9000 zertifiziert.

So wird sichergestellt, dass alle Arbeitsabläufe optimiert, rückverfolgbar und nachvollziehbar sind.

Fremdüberwachung

Eine in DIN EN 197-2 geregelte und von einer für die Zementprüfung akkreditierten Prüfstelle durchgeführte Fremdüberwachung ergänzt die Eigenüberwachung.

Zertifizierter Zement

Zemente, die die Konformitätsbewertung nach DIN EN 197-2 erfüllen, erhalten von einer neutralen Zertifizierungsstelle ein Konformitätszertifikat und müssen mit dem EG-Konformitätszeichen gekennzeichnet werden (Abb. 1.1.19).







Abb. 1.1.19 EG-Konformitätszeichen

Zemente

Sorten und Eigenschaften der Holcim Zemente

Weitergehende Informationen über die folgend aufgeführten Zemente sind den < Produktinformationen > der Holcim (Deutschland) AG zu entnehmen.

Bei Fragen bezüglich der Eignung eines bestimmten Zements oder zur Lösung spezieller Betonprobleme hilft das Beratungsteam des Technical Marketing gerne weiter.

Holcim-Duo 3

Hochofenzement, CEM III/A 32,5 N

Holcim-Duo 3 ist ein Hochofenzement CEM III/A 32,5 N gemäß DIN EN 197-1. Sein hoher Hüttensandgehalt verleiht ihm besondere Eigenschaften. Holcim-Duo 3 ermöglicht die Herstellung von Betonen mit langer Verarbeitungszeit. Aufgrund seiner moderaten Wärmeund Festigkeitsentwicklung kann Holcim-Duo 3 speziell bei massigen Bauteilen eingesetzt werden. Betone mit Holcim-Duo 3 weisen relativ helle Betonoberflächen auf. Holcim-Duo 3 ist ein besonders umweltfreundlicher Zement. Seine Herstellung verursacht nur etwa 50 % der CO₂-Emissionen, die bei der Produktion von Portlandzement entstehen.

Holcim-Duo 3-LH/NA Hochofenzement, CEM III/A 32,5 N-LH/NA

Holcim-Duo 3-LH/NA hat die gleichen Eigenschaften wie Holcim-Duo 3, erfüllt jedoch zusätzlich die Anforderungen an einen Zement CEM III/A 32,5 N-LH/NA mit niedriger Hydratationswärme und niedrigem wirksamen Alkaligehalt nach DIN EN 197-1 bzw. DIN 1164-10. Holcim-Duo 3-LH/NA eignet sich für die Herstellung von massigen Bauteilen, für die eine niedrige Wärmeentwicklung besonders wichtig ist. Darüber hinaus kann Holcim-Duo 3-LH/NA als vorbeugende Maßnahme bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnung eingesetzt werden.

Holcim-Duo 4

Holcim-Duo 4 ist ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N gemäß DIN EN 197-1. Durch ein optimal abgestimmtes Mischungsverhältnis der Ausgangsstoffe Hüttensand und Portlandzement erhält Holcim-Duo 4 seine ausgewogenen Eigenschaften. Holcim-Duo 4 weist vergleichbare Anfangsfestigkeiten wie Zement der Festigkeitsklasse 32,5 R auf, erreicht jedoch höhere Endfestigkeit. Holcim-Duo 4 ist als Standardzement für Transportbeton hervorragend geeignet, da er das ganze Jahr über verwendet werden kann. Holcim-Duo 4 ist ein besonders umweltfreundlicher Zement. Seine Herstellung verursacht nur etwa 50 % der CO₂- Emissionen, die bei der Produktion von Portlandzement entstehen.

Holcim-Duo 4-NA

Hochofenzement, CEM III/A 42,5 N-NA

Holcim-Duo 4-NA hat die gleichen Eigenschaften wie Holcim-Duo 4, erfüllt jedoch zusätzlich die Anforderungen an einen Zement CEM III/A 42,5 N-NA mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt nach DIN 1164-10. Holcim-Duo 4-NA kann als vorbeugende Maßnahme gegen schädigende Alkalireaktionen bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnung eingesetzt werden.

Holcim-Aqua

Hochofenzement, CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA

Holcim-Aqua ist ein Hochofenzement mit besonders hohem Hüttensandgehalt, was Holcim-Aqua eine Reihe besonderer Eigenschaften verleiht. Holcim-Aqua ist ein Zement mit niedriger Hydratationswärme, hohem Sulfatwiderstand und geringem wirksamen Alkaligehalt. Holcim-Aqua erfüllt alle Anforderungen an einen Zement CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA gemäß DIN EN 197-1 bzw. DIN 1164-10. Holcim-Aqua eignet sich hervorragend für die Herstellung von massigen Bauteilen und für Betone in aggressiver Umgebung. Holcim-Aqua wird besonders umweltfreundlich produziert. Die herstellungsbedingten CO₂-Emissionen von Holcim-Aqua betragen nur etwa 30% der von Portlandzement.

Holcim-Aqua 4

Holcim-Aqua 4 ist ein besonders leistungsstarker Hochofenzement CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA. Er kombiniert die besonderen Eigenschaften niedrige Hydratationswärme, hoher Sulfatwiderstand und niedriger wirksamer Alkaligehalt mit einer Festigkeitsentwicklung, die der Festigkeitsklasse 42,5 N entspricht. Holcim-Aqua 4 ermöglicht die Herstellung von massigen Bauteilen und von Bauteilen für aggressive Umgebung auch in anspruchsvollen Betonfestigkeitsklassen. Sein hoher Hüttensandgehalt zeichnet Holcim-Aqua 4 als sehr umweltfreundlich hergestellten Zement aus.

Holcim-Ferro 3

ortlandhüttenzement, CFM II/B-S 32.5 R

Holcim-Ferro 3 entspricht einem Portlandhüttenzement CEM II/B-S 32,5 R gemäß DIN EN 197-1. Seine ausgewogenen Eigenschaften machen ihn zum wirtschaftlichen Standardzement für viele Anwendungsbereiche. Holcim-Ferro 3 kann als Normzement uneingeschränkt für Beton, Stahlbeton, Spannbeton, Estrich, Putz- und Mauermörtel verwendet werden. Darüber hinaus ist Holcim-Ferro 3 auch als Fahrbahndeckenzement einsetzbar. Holcim-Ferro 3 ist ein umweltfreundlicher Zement. Bei vergleichbaren Leistungsmerkmalen zu einem CEM I 32,5 R entstehen bei seiner Herstellung ca. 25 % weniger CO₂-Emissionen.

Holcim-Ferro 3-NA

Portlandhüttenzement, CEM II/B-S 32,5 R-NA

Holcim-Ferro 3-NA hat die gleichen Eigenschaften wie Holcim-Ferro 3, erfüllt jedoch zusätzlich die Anforderungen an einen Zement CEM II/B-S 32,5 R-NA mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt nach DIN 1164-10. Holcim-Ferro 3-NA kann als vorbeugende Maßnahme gegen schädigende Alkalireaktionen bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnung eingesetzt werden.

Holcim-Ferro 4

Portlandhüttenzement. CEM II/A-S 42.5 R

Holcim-Ferro 4 ist ein leistungsstarker Portlandhüttenzement CEM II/A-S 42,5 R nach DIN EN 197-1. Aufgrund seiner hohen Frühfestigkeiten und der durch den Hüttensand bedingten guten Verarbeitungseigenschaften ist er für die Herstellung von Betonwaren besonders geeignet. Holcim-Ferro 4 kann aber ebenso für anspruchsvolle Ingenieurbauwerke verwendet werden und eignet sich auch hervorragend für die Herstellung von Betonfahrbahndecken mit Waschbetonoberfläche. Holcim-Ferro 4 wird umweltschonend hergestellt. Die herstellungsbedingten $\mathrm{CO_2}\text{-Emissionen}$ sind um ca. 15 % geringer als bei einem Portlandzement.

Holcim-Pur 3

Portlandzement, CEM I 32,5 R

Holcim-Pur 3 ist ein Portlandzement CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1. Aufgrund seiner ausgewogenen Eigenschaften ist Holcim-Pur 3 für viele Anwendungen geeignet. Holcim-Pur 3 kann als Normzement uneingeschränkt für Beton, Stahlbeton, Spannbeton, Estrich, Putz- und Mauermörtel verwendet werden. Darüber hinaus ist Holcim-Pur 3 auch als Fahrbahndeckenzement einsetzbar. Alternativ zu Holcim-Pur 3 bietet die Holcim (Deutschland) AG mit Holcim-Ferro und Holcim-Duo hüttensandhaltige Zemente an, die bei gleichen Leistungsmerkmalen eine deutlich bessere CO₂-Bilanz aufweisen.

Holcim-Pur 4 N

Portlandzement, CEM I 42,5 N

Holcim-Pur 4 N ist ein Portlandzement CEM I 42,5 N und ermöglicht die Herstellung von Betonen in anspruchsvollen Betonfestigkeitsklassen bei einer moderaten Entwicklung der Frühfestigkeiten. Holcim-Pur 4 N eignet sich in besonderer Weise für die Herstellung von Betonfahrbahnen mit Waschbetonoberfläche.

Holcim-Pur 4

Portlandzement, CEM I 42,5 R

Holcim-Pur 4 ist ein leistungsstarker Portlandzement CEM I 42,5 R nach DIN EN 197-1 mit schneller Festigkeitsentwicklung und hohen Anfangs- und Endfestigkeiten. Holcim-Pur 4 eignet sich besonders für die Herstellung von Fertigteilen und Betonwaren sowie für anspruchsvolle Ingenieurbauwerke. Holcim-Pur 4 ist für das Betonieren bei kalter Witterung oder bei kurzen Ausschalfristen vorteilhaft. Holcim-Pur 4 kann darüber hinaus für spezielle Anwendungen wie z.B. die Herstellung von Einpressmörtel oder Porenbeton verwendet werden.

Holcim-Pur 4-NA

Portlandzement, CEM I 42,5 R-NA

Holcim-Pur 4-NA hat die gleichen Eigenschaften wie Holcim-Pur 4, erfüllt jedoch zusätzlich die Anforderungen an einen Zement CEM I 42,5 R-NA mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt nach DIN 1164-10. Holcim-Pur 4-NA kann als vorbeugende Maßnahme gegen schädigende Alkalireaktionen bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnung eingesetzt werden.

Holcim-Pur 5

Portlandzement, CEM I 52,5 R

Holcim-Pur 5 ist ein hochfein aufgemahlener Portlandzement CEM I 52,5 R nach DIN EN 197-1 mit besonders schneller Festigkeitsentwicklung und sehr hohen Frühund Endfestigkeiten. Er eignet sich für die Herstellung von Fertigteilen und Betonwaren, die bereits nach kürzester Zeit hohe Festigkeit aufweisen müssen. Holcim-Pur 5 kann auch für die Herstellung von hochfesten Betonen eingesetzt werden.

Holcim-Pur 5-NA

Portlandzement, CEM I 52,5 R-NA

Holcim-Pur 5-NA hat die gleichen Eigenschaften wie Holcim-Pur 5, erfüllt jedoch zusätzlich die Anforderungen an einen Zement CEM I 52,5 R-NA mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt nach DIN 1164-10.
Holcim-Pur 5-NA kann als vorbeugende Maßnahme gegen schädigende Alkalireaktionen bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnung eingesetzt werden.

Holcim-Sulfo Portlandzement, CEM | 52,5 R-HS/NA

Holcim-Sulfo ist ein schnell erhärtender Portlandzement CEM I 52,5 R-HS/NA mit besonderen Eigenschaften nach DIN 1164-10. Holcim-Sulfo weist eine hohe Sulfatbeständigkeit auf und ist für die Herstellung von Bauteilen geeignet, die einem aggressiven Milieu ausgesetzt sind. Der niedrig wirksame Alkaligehalt des Holcim-Sulfo ermöglicht seinen Einsatz auch bei der Verwendung von alkaliempfindlicher Gesteinskörnung.

Holcim-Pecta

Portlandzement, CEM I 32,5 R

Holcim-Pecta ist ein hydrophobierter Portlandzement speziell für die Bodenverfestigung. Holcim-Pecta erlaubt die zielsichere Einstellung der gewünschten Bodenfestigkeit und kann witterungsunabhängig verarbeitet werden. Seine speziellen Eigenschaften machen Holcim-Pecta besonders wirtschaftlich. Holcim-Pecta erfüllt alle Anforderungen an einen Portlandzement CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1.

Holcim-Trass

Portlandpuzzolanzement, CEM II/B-P 32,5 R

Holcim-Trass ist ein Portlandpuzzolanzement CEM II/B-P 32,5 R nach DIN EN 197-1. Hochwertiger Portlandzement und Trass – ein natürlicher Rohstoff mit puzzolanischen Eigenschaften – sind die Hauptbestandteile des Holcim-Trass. Holcim-Trass ist ein Zement mit sehr guten Verarbeitungseigenschaften und geringer Ausblühneigung. Mit Holcim-Trass hergestellte Mörtel eignen sich besonders für Natursteinarbeiten und für die Restaurierung historischer Bausubstanz.

Holcim-Binder

Putz- und Mauerbinder MC 5

Holcim-Binder ist ein Putz- und Mauerbinder MC 5 nach DIN EN 413-1. Holcim-Binder eignet sich für die Herstellung von Innen- und Außenputzen sowie für die Herstellung von Mauermörtel. Seine spezielle Zusammensetzung macht Holcim-Binder zu einem vielseitig einsetzbaren Bindemittel mit hervorragenden Verarbeitungseigenschaften und besonders gutem Haftvermögen. Holcim-Binder kann mit Mörtelschlitten und Putzmaschinen verarbeitet werden und ist selbstverständlich chromatarm nach Direktive 2003/53/EG.

Hydratation des Zements

Wird Zement mit Wasser gemischt, erfolgt eine chemische Reaktion. Man nennt dies die Hydratation des Zements. Sie ist mit erheblicher Wärmeentwicklung, der so genannten Hydratationswärme, verbunden (Abb. 1.1.20). Die Hydratationsreaktion führt zum Erstarren des Zementleims und mit fortschreitender Erhärtung zur Bildung von Zementstein.

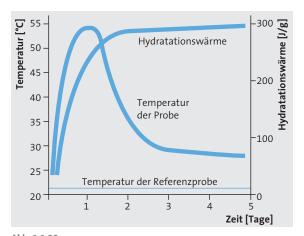


Abb. 1.1.20 Verlauf von Temperatur und Hydratationswärme eines CEM I 42,5 N im Versuch nach Langavant

Durch die Zementhydratation entstehen im Wesentlichen zwei neue mineralische Stoffe (Abb. 1.1.21):

- kleine nadelförmige Gebilde aus Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen) von leicht schwankender Zusammensetzung, die sich miteinander verfilzen und damit ein dichtes Gefüge von hoher Festigkeit bilden
- große plattige Calciumhydroxid-Kristalle Ca(OH)₂ –, die keinen Beitrag zur Festigkeit erbringen, jedoch infolge ihrer hohen alkalischen Wirkung die Bewehrung vor Korrosion schützen.

Die beiden Reaktionsprodukte der Zementhydratation wirken sich wie folgt aus:

CSH

- + Betonfestigkeit
- + Dichtigkeit
- + Betondauerhaftigkeit

 $Ca(OH)_2$ + Bewehrungsschutz gegen Korrosion (pH > 12)

- Wasserlöslichkeit
- Kalkausblühungen
- Reaktionspartner bei Sulfat-Angriff und Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

Zementlagerung und Haltbarkeit

Zement nimmt bei längerer und/oder ungeschützter Lagerung Feuchtigkeit auf, was zur Klumpenbildung und einer Minderung des Erhärtungsvermögens führt. Lassen sich die Klumpen noch zwischen den Fingern zerdrücken, ist die Festigkeitsminderung vernachlässigbar klein. In Säcken lässt sich Zement nur eine beschränkte Zeit lagern. Sackzement lagert man am besten in trockenen Gebäuden. Vorübergehend im Freien gestapelter Sackzement muss auf einer belüfteteten Kantholzunterlage gelagert werden (Abb. 1.1.22). Abdeckfolien dürfen die Zementsäcke nicht unmittelbar berühren, da bei Kondenswasserbildung die Säcke feucht werden.

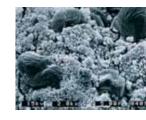


Abb. 1.1.21
Zementstein unter dem Rasterelektronenmikroskop (weißer Strich als Vergleichsmaßstab = 0,005 mm)

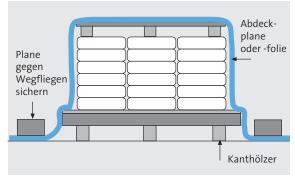


Abb. 1.1.22 Sacklagerung im Freien

Schüttdichte von Zement

Lose eingefüllt	900–1250 kg/m³ (je nach Zementtyp)
Gepresst durch Lagerung	bis 2200 kg/m³ (je nach Lagerungsdauer, -bedingungen und Zementtyp)

Abb. 1.1.23 Schüttdichte von Zement

Sicherheitshinweis

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel. Bei Feuchtigkeits- oder Wasserzutritt kommt es zu einer alkalischen Reaktion. Die Berührung mit der Haut soll nach Möglichkeit vermieden werden. Gelangt Zement ins Auge, muss es sofort gründlich mit Wasser ausgespült werden, nötigenfalls ist der Arzt zu konsultieren.

Wasser

Allgemeines

Zur Hydratation des Zementes wird Wasser benötigt. Für die Festigkeit des Festbetons ist der so genannte Wasserzementwert, das Verhältnis von Wasser zu Zement, entscheidend. Der auf den Wasserzementwert anrechenbare Wassergehalt setzt sich zusammen aus:

- dem Zugabewasser
- der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung
- gegebenenfalls dem Wasseranteil der Zusatzmittel und Zusatzstoffe (Silicastaub-, Pigmentsuspensionen usw.).

Neben den zu erzielenden Festbetoneigenschaften muss der Frischbeton auch gut verarbeitbar sein. Die Konsistenz kann dabei durch den Wassergehalt gesteuert werden.

In hochwertigen Betonzusammensetzungen kommen heute in der Regel verflüssigende Betonzusatzmittel zum Einsatz. Diese ermöglichen die unabhängige Beeinflussung von Frisch- und Festbetoneigenschaften in gewissen Grenzen (siehe Kap. 1.4).

Abb. 1.2.1 Zugabewasser aus der Trinkwasserversorgung



Anforderungen an das Zugabewasser

Das Zugabewasser zur Herstellung von Beton muss den Vorgaben der DIN EN 1008 entsprechen. Als Zugabewasser ist das in der Natur vorkommende Wasser geeignet (Abb. 1.2.1), sofern es nicht erhebliche Mengen an Stoffen enthält, die

- das Erhärten des Betons verzögern oder verhindern (z.B. Zucker, Humussäuren)
- unkontrolliert Luftporen einführen und dadurch die Festigkeit des Betons mindern (z.B. Algen, Öle, Fette, Schwebstoffe, verschiedene anorganische Salze)
- zur Korrosion der Bewehrung führen.

Das Zugabewasser soll klar, farb- und geruchlos sein und beim Schütteln keinen bleibenden Schaum bilden. Die Gehalte an betonschädigenden Stoffen wie Chloride, Sulfate, Alkalien oder organische Verunreinigungen dürfen gewisse Grenzen nicht überschreiten und müssen gegebenenfalls ermittelt werden.

Viele betonschädliche Stoffe sind im Zugabewasser harmloser als in Wasser, das später auf erhärteten Beton einwirkt. Sulfat- und kohlensäurehaltige Wässer gelten beispielsweise als betonaggressiv, d.h. Festbeton kann von außen her geschädigt oder zerstört werden. Als Zugabewasser können sie sich aber durchaus eignen.

Wasser

Restwasser

Als geeignet gilt auch Restwasser aus der Betonherstellung (Abb. 1.2.2).

Es darf als Zugabewasser für unbewehrten, bewehrten und vorgespannten Beton verwendet werden, wenn die folgenden Anforderungen nach DIN EN 1008 erfüllt sind:

- die zusätzliche Menge von Feinstoffen, die bei der Verwendung von Restwasser erzielt wird, muss weniger als 1 Prozent der Gesamtgewichtsmenge der in der Mischung enthaltenen Gesteinskörnung betragen
- der mögliche Einfluss des Restwassers muss bei besonderen Anforderungen an den Beton, wie z.B. bei Sichtbeton, Spannbeton, Luftporenbeton, selbstverdichtendem Beton, aggressiven Umgebungseinflüssen ausgesetztem Beton usw., berücksichtigt werden. In der Praxis wird Restwasser bei diesen Betonen nicht verwendet
- die Menge des verwendeten Restwassers muss möglichst gleichmäßig über eine Tagesproduktion verteilt werden

Einschränkend gilt gemäß DIN 1045-2:

- Die Verwendung von Restwasser ist nur möglich für Beton bis einschließlich Festigkeitsklasse C 50/60 oder
- Für die Herstellung von hochfestem Beton und Luftporen-Beton darf Restwasser nicht verwendet werden

Die Verwendung von Restwasser für die Herstellung von Beton nach ZTV-ING ist ebenfalls nicht erlaubt.

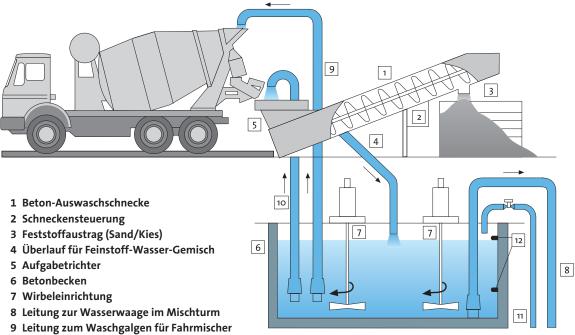


Abb. 1.2.2 Recyclinganlage mit Auswaschschnecke. Schematische Darstellung und Außenaufnahme

- 10 Spülleitung für Schneckentrichter
- 11 Frischwasserzufuhr
- 12 Niveauschalter für Frischwasserzufuhr



Gesteinskörnung

Allgemeines

Unter Gesteinskörnung versteht man in der Regel ein Gemisch aus Sand und Kies unterschiedlicher Korngröße. Das Gemisch aus den einzelnen Korngruppen bildet das Gerüst des Betons und sollte möglichst hohlraumarm aufgebaut sein. Eine qualitativ gute Gesteinskörnung hat gegenüber der umgebenden Bindemittelmatrix Zementstein verschiedene Vorteile:

- höhere Festigkeit
- bessere Dauerhaftigkeit
- keine Volumenveränderung infolge Feuchtigkeit, somit Reduktion des Schwindmaßes im Beton
- Aufnahme von Hydratationswärme und damit dämpfende Wirkung auf den Erhärtungsprozess.

Die Anforderungen an Gesteinskörnung sind in DIN EN 12620 geregelt. Deren Verwendung für die Herstellung von Beton regelt DIN EN 206 bzw. DIN 1045-2. Rezyklierte Gesteinskörnung nach DIN 4226-100 darf gemäß der DAfStb-Richtlinie <Beton mit rezyklierte Zuschlag> verwendet werden. Seit 2008 müssen Gesteinskörnungen nach der AKR-Richtlinie in Alkaliempfindlichkeitsklassen eingeteilt werden (siehe auch S. 26–28).

Abb. 1.3.1 Terminologie nach Norm sowie zusätzliche, in der «Betonpraxis» verwendete Begriffe

DIN EN 12 620	Zusätzliche, in der «Betonpraxis» verwendete Begriffe
Gesteinskörnung	
feine Gesteinskörnung (D ≤ 4 mm)	Sand, Brechsand
grobe Gesteinskörnung (D > 4 mm)	Kies, Splitt
Recycling-Gesteinskörnung	Granulat
Feinanteile (D ≤ 0,063 mm)	
Mehlkornanteil (D ≤ 0,125 mm)	
Korngruppe d/D (z.B. 4/8)	
Korngemisch (z.B. 0/32)	
Kornzusammensetzung	

- D Sieblochweite des oberen Begrenzungssiebs der Korngruppe in mm
- d Sieblochweite des unteren Begrenzungssiebs der Korngruppe in mm



Eigenschaften

Die wichtigsten Eigenschaften der Gesteinskörnung sind:

- Kornzusammensetzung
- Gesteinsqualität, Kornform und Oberflächenbeschaffenheit
- Sauberkeit
- Rohdichte, Schüttdichte (Raumgewicht) und Feuchtigkeitsgehalt.

Abb. 1.3.2 Kies-und Sandgewinnung aus natürlichen Vorkommen

Gesteinskörnung

Kornzusammensetzung

Die Anforderungen an die Kornzusammensetzung und die wichtigsten Eigenschaften von Gesteinskörnung enthalten DIN EN 12 600 und DIN V 20 000-103.

Die Kornzusammensetzung einer Gesteinskörnung ist bestimmend für die Packungsdichte (den Hohlraumanteil) des Korngerüsts. Zusammen mit der Oberflächenbeschaffenheit, der spezifischen Oberfläche und der Kornform der Einzelkörner ist die Kornzusammensetzung maßgebend für den Wasserbedarf und für die Verarbeitbarkeit des Betons verantwortlich.

Der Kornaufbau eines Korngemischs wird vom Mengenverhältnis der einzelnen Korngruppen bestimmt (Abb. 1.3.3 bis 1.3.5). Durch Aussieben des Gemischs mit

genormten Quadratlochsieben verbleibt auf jedem Sieb ein bestimmter Rückstand. Maßgebend ist die volumetrische Verteilung der Durchgänge mit ihren verschiedenen Korndurchmessern. Da aber weitestgehend alle Korngruppen einer Gesteinskörnung annähernd gleiche Rohdichten aufweisen, ist die übliche Darstellung in Massenprozenten bei der Angabe der Kornzusammensetzung ausreichend (Abb. 1.3.13 bis 1.3.15).

Die verbindlichen Begrenzungssiebe für die Bezeichnung der Korngruppen (Grund- und Ergänzungssiebsatz 1) und der Prüfsiebsatz zur Bestimmung der Kornzusammensetzung sind in Abb. 1.3.6 dargestellt.



Abb. 1.3.3
Schlecht abgestuftes Korngemisch
mit zu vielen groben Gesteinskörnern:
Der Zementleim vermag die verbleibenden
Hohlräume nicht auszufüllen

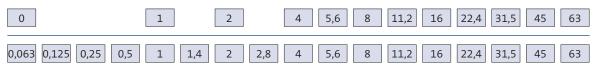


Abb. 1.3.4
Gut abgestuftes Korngemisch:
Genügend Zementleim, um alle
Körner zu umhüllen und die
Hohlräume auszufüllen



Abb. 1.3.5
Schlecht abgestuftes Korngemisch
mit zu vielen feinen Gesteinskörnern:
Beansprucht viel Zementleim oder zu viel
Anmachwasser (starkes Bluten)

Grund- und Ergänzungssiebsatz 1 zur Bezeichnung der Korngröße



Prüfsiebsatz der Kornzusammensetzung

Abb. 1.3.6 Begrenzungs- und Prüfsiebe

Gesteinskörnung

Gesteinsqualität, Kornform und Oberflächenbeschaffenheit

Die Praxis hat gezeigt, dass Korngemische mit ausschließlich gebrochenen Korngruppen gebrauchstauglich sind. Gebrochene Gesteinskörnungen können z.B. die Druck-, Zug- und Abriebfestigkeit des Betons verbessern, können jedoch seine Verarbeitungseigenschaften beeinträchtigen. Dem kann mit einer entsprechenden Anpassung des Zementleimvolumens entgegengewirkt werden

Poröses und zu weiches Material beeinträchtigt die Qualität des Betons. Die Kornform (Abb. 1.3.7), aber auch die Kornabstufung und die Oberflächenbeschaffenheit bestimmen im Wesentlichen den Wasserbedarf und die Verdichtbarkeit des Betons

Abb. 1.3.7 Kornformen und ihre Eigenschaften

	natü	rlich	gebro	ochen		
Kornform	kugelig	nicht kugelig (stengelig/plattig)	kubisch	nicht kubisch (stengelig/plattig)		
Kantigkeit	ru	nd	kar	ntig		
Oberflächen- rauigkeit	gla	att	ra	au		
Kornoberfläche Wasserbedarf	zunehmend —					
Verarbeitbarkeit Verdichtbarkeit	abnehmend					



Abb. 1.3.8 Aussieben und Waschen von Gesteinskörnern in einem Kieswerk

Sauberkeit

Verunreinigte Gesteinskörnungen vermindern die Betonqualität. So kann das Erhärtungsverhalten gestört und der Frostwiderstand gemindert werden. Aus diesem Grund wird die Gesteinskörnung bei der Aufbereitung gewaschen (Abb. 1.3.8).

Rohdichte, Schüttdichte (Raumgewicht) und Feuchtigkeitsgehalt

Die Ursprungsmineralien und die Porigkeit der Gesteinskörnung bestimmen deren Rohdichte (Abb. 1.3.9), die zur Stoffraumrechnung benötigt wird. Die Schüttdichte ist die Masse von lose geschüttetem Material pro Volumeneinheit.

Der Feuchtigkeitsgehalt setzt sich aus der Oberflächenund Kernfeuchte zusammen, wobei die Kernfeuchte bei der Betonherstellung in der Regel eine vernachlässigbare Rolle spielt, so dass der Feuchtigkeitsgehalt mit dem Oberflächenwasser gleichgesetzt werden kann. Während der Feuchtigkeitsgehalt einer groben Gesteinskörnung bis zu drei Massenprozente betragen kann, liegt die Sandfeuchtigkeit in der Regel bei vier bis acht Massenprozenten.

Gesteinskörnung

Gesteinskörnung	Rohdichte [kg/m³]	Gesteinskörnungsart	Anwendung
Regelgesteinskörnung	~ 2650–2800	Fluss- oder Gletscherablagerungen, gebrochene Gesteine	Bewehrter und unbewehrter Beton, Betonwaren
Schwere Gesteinskörnung	≥ 3000	Baryt (Schwerspat), Eisenerz, Hämatit, Stahlgranulat	Beton für Strahlenschutz
Leichte Gesteinskörnung (DIN EN 13 055-1)	≤ 2000	Blähton, Bims, Blähschiefer, Blähglas	Leichtbeton, Isolierbeton, Überbeton
Harte Gesteinskörnung	≥ 2500	Quarz, Korund, Siliciumkarbid	Hartbetonbeläge, abriebfester Beton
Rezyklierte Gesteinskörnung	> 2000	Betonsplitt, -brechsand Bauwerkssplitt, -brechsand	Recyclingbeton

Abb. 1.3.9 Unterteilung der Gesteinskörnung nach ihrer Rohdichte

Der Feuchtigkeitsgehalt ist in der Stoffraumberechnung bei der Gesteinskörnung und beim Zugabewasser zu berücksichtigen.



Abb. 1.3.10 Aufgabetrichter der Gesteinskörnungen für den Elevator im Betonwerk

Definitionen nach DIN EN 12620

Bei den Gesteinskörnungen wird zwischen feinen (Sand, Brechsand) und groben (Kies, Splitt) Gesteinskörnungen sowie Korngemischen unterschieden, wie in Abb. 1.3.11 zusammengestellt.

Bezeichnung	Defi	Beispiele	
Feine Gesteins-	D ≤	4 mm	0/1
körnung (Sand,	unc	l d = 0	0/2
Brechsand)			0/4
Grobe Gesteins-	D≥4 mm	eng gestuft	2/8
körnung	d ≥ 2 mm	D/d ≤ 2 oder	8/16
(Kies, Splitt)		D ≤ 11, 2 mm	16/32
		weit gestuft	4/32
		D/d > 2 und	
		D > 11,2 mm	
Korngemisch	D ≤ 45 mm		0/32
	und $d = 0$		

Abb. 1.3.11

Definition und Beispiele für die Begriffe «feine Gesteinskörnung» (Sand, Brechsand), «grobe Gesteinskörnung» (Kies, Splitt) und «Korngemisch»

Gesteinskörnung

Feine Gesteinskörnungen (Sand, Brechsand)

Es gibt keine Absolut-Anforderungen mehr an die Kornzusammensetzung. Die Hersteller geben eine mittlere «typische Kornzusammensetzung» ihres Sandes an und

müssen diese mit vorgegebenen Grenzabweichungen gemäß Abb. 1.3.12 einhalten und dabei den in Abb. 1.3.13 angegebenen Anforderungen der oberen Sieböffnung D entsprechen.

Grenzabweichungen für den Siebdurchgang [Massen-%]				
0/4	0/2	0/1		
±5	_	_		
_	±5	-		
±20	±20	±5		
±20	±25	±25		
±3	±5	±5		
	0/4 ±5 - ±20 ±20	Siebdurchgang		

Abb. 1.3.12

Grenzabweichungen für die vom Hersteller angegebene typische Kornzusammensetzung von feinen Gesteinskörnungen für allgemeine Zwecke nach DIN EN 12 620

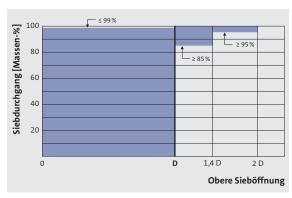
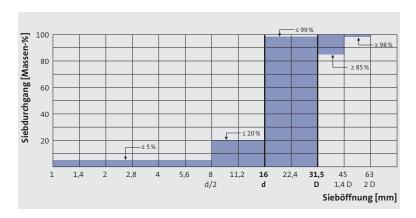


Abb. 1.3.13

Regelanforderungen an die Kornzusammensetzung von Sanden und Brechsanden (feine Gesteinskörnungen)



100 Siebdurchgang [Massen-%] -≥98% L > 90% ≤ 70% 60 40 ≤ 15% 20 5,6 11,2 16 d 63 2 D 1,4 2 d/2 22,4 1,4 D Sieböffnung [mm]

Grobe Gesteinskörnungen (Kies, Splitt)

Bei groben Gesteinskörnungen ist zwischen eng gestuften und weit gestuften zu unterscheiden.

- Bei eng gestuften groben Gesteinskörnungen wird lediglich eine Anforderung an den zulässigen Über- und Unterkornanteil gestellt.
- Bei weit gestuften groben Gesteinskörnungen sind neben den Anforderungen an den zulässigen Über- und Unterkornanteil auch jene an den Absolutgrenzwert und die Grenzabweichung für den Siebdurchgang eines zwischen den Begrenzungssieben liegenden mittleren Siebs einzuhalten (Abb. 1.3.16).

Abb. 1.3.14 (oben)
Beispiel für eng gestufte (16/32)
grobe Gesteinskörnungen (Kies, Splitt),
Kategorie G_c85/20

Abb. 1.3.15 (unten)

Beispiel für weit gestufte (4/32) grobe Gesteinskörnungen (Kies, Splitt), Kategorie G_C90/15

Gesteinskörnung

D/d	Mittleres Sieb [mm]	Absolutgrenzwerte [Massen-%]	Grenzabweichung für den von den Herstellenden angegebenen typischen Siebdurchgang
< 4	D/1,4	25 bis 70	± 15
≥ 4	D/2	25 bis 70	± 17,5

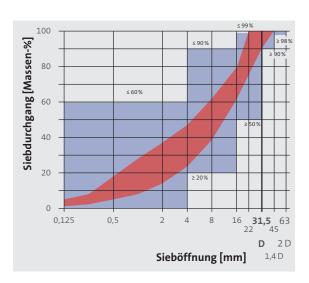
Wenn das wie angegeben errechnete mittlere Sieb nicht vorhanden ist, muss das nächstliegende Sieb der Reihe verwendet werden.

Abb. 1.3.16
Absolutgrenzwerte und Grenzabweichungen für den Siebdurchgang durch das mittlere Sieb für grobe Gesteinskörnungen

Korngemische

Bei Korngemischen handelt es sich um Gemische aus feinen und groben Gesteinskörnungen, die nach geeigneten prozentualen Anteilen zusammengesetzt werden und Absolutgrenzwerten genügen müssen (blauer Bereich in Abb. 1.3.17). In der Praxis bewährte Kornzusammensetzungen liegen in den rot gekennzeichneten Bereichen der Abb. 1.3.17.

Um eine gleichbleibende Betonqualität einhalten zu können, sollte das Betonwerk mit dem Lieferanten einen definierten Bereich der Kornzusammensetzung vereinbaren, der einzuhalten ist.



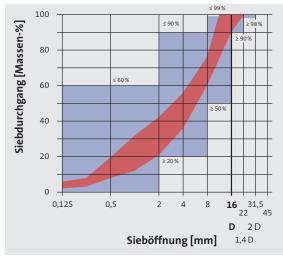


Abb. 1.3.17
Korngemische. Die
Absolutgrenzwerte
nach DIN EN 12 620
sind blau, bewährte
Kornzusammensetzungen rot
gekennzeichnet,
Kategorie G_A90

Geometrische, physikalische und chemische Anforderungen

Die Gesteinskörnung nimmt im Beton den weitaus größten Volumenanteil ein. Wesentliche Eigenschaften, wie etwa die Frostwiderstandsfähigkeit, werden deshalb maßgeblich von den Eigenschaften der verwendeten Gesteinskörnung beeinflusst. Deshalb können neben den Anforderungen an die Kornzusammensetzung einer Gesteinskörnung in Abhängigkeit ihrer Verwendung auch

verschiedene geometrische, physikalische und chemische Anforderungen gestellt werden. Die Dauerhaftigkeit wird über mineralogische Prüfungen nachgewiesen.

Gesteinskörnung

Korngruppen

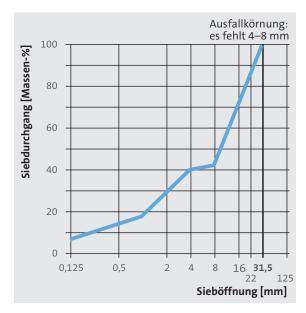
Im Allgemeinen werden Gesteinskörnungen in definierten Korngruppen hergestellt und verwendet (Abb. 1.3.18).

Bei der Verwendung von gebrochenen Korngruppen muss die Eignung durch systematische, schlüssige Vorversuche nachgewiesen werden. Die Korngruppe 4–8 mm hat einen wesentlichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und den Wasserbedarf. Sie wird deshalb als «Sperrkorn» bezeichnet. Ihr Anteil im Korngemisch ist möglichst gering zu halten. Bei Kornzusammensetzungen, in denen einzelne Korngruppen praktisch ganz oder teilweise fehlen, spricht man von «Ausfallkörnungen». Die Kornzusammensetzung hat dort einen horizontalen oder nur leicht ansteigenden Verlauf (Abb. 1.3.19). Durch die Verwendung von «Ausfallkörnung» können die Verdichtbarkeit und Pumpfähigkeit des Betons verbessert werden.

Abb. 1.3.18 Gebräuchliche Korngruppen

Beispiele von Korngruppen	Begriffe nach DIN EN 12 620		
≤ 0,063 mm	Feinanteile		
≤ 0,125 mm	Mehlkorn		
Natürlich gerundete			
Korngruppen			
0 – 4 mm	Sand	feine Gesteinskörnung	
4 – 8 mm	Kies		
8 – 16 mm	Kies		
16 – 32 mm	Kies	grobe Gesteinskörnung	
≥ 32 mm	Grobkies		
Natürlich gebrochene			
Korngruppen			
0 – 4 mm	Brechsand	feine Gesteinskörnung	
4 – 8 mm	Splitt		
8 – 16 mm	Splitt		
16 – 22 mm	Splitt	grobe Gesteinskörnung	
≥ 22 mm	Schotter		
Industriell hergestellte			
Gesteinskörnung/			
Recycling-Gesteinskörnung			
	Betonbrechsand		
0 – 4 mm	Mischabbruch- brechsand	feine Gesteinskörnung	
	Betongranulat		
> 4 mm	Mischabbruch granulat	grobe Gesteinskörnung	

Abb. 1.3.19 Kornzusammensetzung einer Ausfallkörnung



Gesteinskörnung

Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion

Einige Gesteinskörnungen enthalten alkalireaktive Kieselsäure. Diese Gesteinskörnungen können mit dem im Porenwasser des Betons gelösten Alkalihydroxid zu einem Alkalisilikat reagieren. Unter bestimmten Voraussetzungen kann diese Reaktion zu einer Volumenvergrößerung mit anschließender Schädigung des Betons führen. Diese Reaktion wird als «Alkali-Kieselsäure-Reaktion» (AKR) bezeichnet. Ablauf und Ausmaß der Reaktion hängen insbesondere von der Art und Menge der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung, ihrer Größe und Verteilung, dem Alkalihydroxidgehalt in der Porenlösung sowie den Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen des erhärteten Betons ab. Eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton kann auch noch nach Monaten oder Jahren auftreten und zu schwerwiegenden Schäden führen.

Zur Vermeidung solcher Schäden gilt in Deutschland die DAfStb-Richtlinie «Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton» (Alkali-Richtlinie). Mit Wirkung der A2-Änderung wurden die Feuchtigkeitsklassen aus der Alkali-Richtlinie in die DIN 1045-2 übernommen.

Anhand der zu erwartenden Umgebungsbedingungen ist jedes Bauteil einer der vier Feuchtigkeitsklassen zuzuordnen (Abb. 1.3.20). Die Feuchtigkeits- sowie die Expositionsklassen sind dem Betonhersteller anzugeben. Daraus ergeben sich eventuell zusätzliche Anforderungen an die Gesteinskörnung oder den Zement (Abb. 1.3.25 – Abb. 1.3.27).

Klasse	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen	Abb. 1.3.20 Feuchtigkeitsklassen
			_

Klasse	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen
WO	Beton, der nach normaler Nachbehandlung nicht längere Zeit feucht und nach dem	• Innenbauteile des Hochbaus
	Austrocknen während der Nutzung	Bauteile, auf die Außenluft, nicht jedoch z.B. Niederschläge,
	weitgehend trocken bleibt	Oberflächenwasser, Bodenfeuchte einwirken können und/oder
	weitgehend trocken bleibt	die nicht ständig einer relativen Luftfeuchte von mehr als 80 % ausgesetzt werden
WF	Beton, der während der Nutzung häufig oder	Ungeschützte Außenbauteile, die z.B. Niederschlägen,
VVF	längere Zeit feucht ist	Oberflächenwasser oder Bodenfeuchte ausgesetzt sind
		• Innenbauteile des Hochbaus für Feuchträume, wie z.B.
		Hallenbäder, Wäschereien und andere gewerbliche Feuchträume,
		in denen die relative Luftfeuchte überwiegend höher als 80% ist
		Bauteile mit häufiger Taupunktunterschreitung, wie z.B.
		Schornsteine, Wärmeübertragerstationen, Filterkammern und Viehställe
		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	Bauteile mit Meerwassereinwirkung
	nach Klasse WF häufiger oder langzeitiger Alkalizufuhr von außen ausgesetzt ist	Bauteile unter Tausalzeinwirkung ohne zusätzliche hohe
	Alkalizululli voli auiseli ausgesetzt ist	dynamische Beanspruchung (z.B. Spritzwasserbereiche, Fahr- und
		Stellflächen in Parkhäusern)
		Bauteile von Industriebauten und landwirtschaftlichen
		Bauwerken (z.B. Güllebehälter) mit Alkalisalzeinwirkung
WS	Beton, der hoher dynamischer Beanspruchung	Bauteile unter Tausalzeinwirkung mit zusätzlicher hoher
	und direktem Alkalieintrag ausgesetzt ist	dynamischer Beanspruchung (z.B. Betonfahrbahnen)

Gesteinskörnung

Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton nach EN 206-1 und DIN 1045-2 muss unabhängig vom Gewinnungsgebiet bezüglich ihrer Alkalireaktivität beurteilt und gekennzeichnet werden. Die Prüfung, Einstufung und Überwachung wird in der Alkali-Richtlinie geregelt. Teil 2 der Richtlinie betrifft Gesteinskörnung aus bestimmten Gewinnungsgebieten in Norddeutschland (siehe Abb 3.8.1). Teil 3 der Richtlinie behandelt Gesteinskörnung aus gebrochenem oder rezykliertem Gestein. Gesteinskörnungen sind in eine der Alkaliempfind-

lichkeitsklassen einzustufen (siehe Abb. 1.3.21). Diese Klassen reichen von EI (unbedenklich) bis EIII (bedenklich). Ohne Zertifizierung nach Alkali-Richtlinie wird die Gesteinskörnung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII eingestuft.

Auf dem Beton-Lieferschein sind die Feuchtigkeitsklasse und die Alkaliempfindlichkeitsklasse der Gesteinskörnung anzugeben. Ohne diese Angaben darf der Beton nur für Feuchtigkeitsklasse WO (Innenbauteile) eingesetzt werden.

Abb. 1.3.21 Alkaliempfindlichkeitsklassen für Gesteinskörnung

Klasse	Gesteinskörnungen	Beurteilung hinsichtlich AKR
E I-O	0	unbedenklich
E II-O	Opalsandstein einschließlich Kieselkreide	bedingt brauchbar
E III-O	Neseikieide	bedenklich
E I-OF		unbedenklich
E II-OF	Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint	bedingt brauchbar
E III-OF	Nieseikielae una riint	bedenklich
	gebrochene Grauwacke	
E I-S	• gebrochener Quarzporphyr (Rhyolith)	unbedenklich
	• gebrochener Oberrhein-Kies	
	 rezyklierte Körnungen 	
	 Kies mit > 10 M% der vorgenannten Körnungen 	
E III-S	 andere gebrochene, nicht als unbedenklich eingestufte Gesteinskörnungen ¹⁾ andere gebrochene Gesteinskörnungen ohne baupraktische Erfahrungen ²⁾ 	bedenklich

Für die Einstufung der unterschiedlichen Gesteinskörnungen gelten bestimmte Kriterien (Abb. 1.3.22-1.3.24)

Abb. 1.3.22 Kriterien zur Einstufung von Gesteinskörnung mit Opalsandstein einschließlich Kieselkreide

Bestandteile	Grenzwerte in M% für die Alkaliempfindlichkeitsklassen		
	E I-O	E II-O	E III-O
Opalsandstein einschließlich Kieselkreide (über 1 mm) 1)	≤ 0,5	≤ 2,0	> 2,0

Abb. 1.3.23 Kriterien zur Einstufung von Gesteinskörnung mit Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint

Bestandteile	Grenzwerte in M% für die Alkaliempfindlichkeitsklassen		
	E I-OF	E II-OF	E III-OF
Opalsandstein einschließlich Kieselkreide (über 1 mm) $^{ m 1)}$	≤ 0,5	≤ 2,0	> 2,0
reaktionsfähiger Flint (über 4 mm)	≤ 3,0	≤ 10,0	> 10,0
5 x Opalsandstein einschließlich Kieselkreide + reaktionsfähiger Flint	≤ 4,0	≤ 15,0	> 15,0

Gesteinskörnung

Kriterium	Alkaliempfindlichkeitsklasse 1)		
	E I-S	E III-S	
Grenzwerte für die Dehnung der Betonbalken in mm/m²	ε ≤ 0,6	ε>0,6	
Rissbildung der Würfel	keine	Stark ³⁾	

Abb. 1.3.24 Kriterium für die Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklassen E I-S und E III-S

Bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnung sind in bestimmten Fällen Maßnahmen zu treffen und die Verwendung von Zementen mit niedrigem wirksamem Alkaligehalt (NA-Zemente) erforderlich (Abb. 1.3.25–1.3.27).

An Zemente für Betonfahrbahnen (Feuchtigkeitsklasse WS) werden zur Vermeidung von AKR durch die TL Beton-StB 07 spezielle Anforderungen hinsichtlich ihres Alkaligehaltes gestellt (Abb. 1.3.28).

Alkali-	Feuchtigkeitsklasse			
empfindlichkeits- klasse	wo	WF	WA	WS
E I-O	keine	keine	keine	Zemente mit begrenztem Alkaligehalt ¹⁾ (Fahrbahndeckenzement)
E II-O	keine	keine	NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung
E III-O	keine	NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung	Austausch der Gesteinskörnung
¹⁾ siehe Abb. 1.3.28				

Abb. 1.3.25 Vorbeugende Maßnahmen für Beton mit einem Zementgehalt z≤330 kg/m³

Alkali-	Feuchtigkeitsklasse			
empfindlichkeits- klasse	WO	WF	WA	WS
E I-OF	keine	keine	keine	Zemente mit
				begrenztem Alkaligehalt ¹
				(Fahrbahndeckenzement)
E II-OF	keine	NA-Zement	NA-Zement	Austausch der
				Gesteinskörnung
E III-OF	keine	NA-Zement	Austausch der	Austausch der
			Gesteinskörnung	Gesteinskörnung

Abb. 1.3.26 Vorbeugende Maßnahmen für Beton mit einem Zementgehalt z > 330 kg/m³

 $^{^{1)}}$ Maßgebend ist die jeweils ungünstigere Bewertung.

²⁾ Nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung einschließlich Wärme- und Feuchtedehnung.

³⁾ Mit Rissbreiten w \geq 0,2 mm.

Gesteinskörnung

Abb. 1.3.27 Vorbeugende Maßnahmen für Beton bei Alkaliempfindlichkeitsklassen EI-S bis EIII-S

Alkali-	Zementgehalt	<u>Feuchtigkeitsklasse</u>			
empfindlich- keitsklasse	[kg/m³]	wo	WF	WA	WS
E I-S	ohne Festlegung	keine	keine	keine	Zemente mit begrenztem Alkaligehalt (Fahrbahndeckenzement)
	z ≤ 300	keine	keine	keine	Zemente mit begrenztem Alkaligehalt ²⁾ (Fahrbahndeckenzement)
E III-S ¹⁾	300 < z ≤ 350	keine	keine	Gutachten oder NA-Zement	Zemente mit begrenztem Alkaligehalt ²⁾ (Fahrbahndeckenzement) und Austausch der Gesteinskörnung oder Gutachten
	z > 350	keine	Gutachten oder NA-Zement	Gutachten oder Austausch der Gesteinskörnung	Zemente mit begrenztem Alkaligehalt (Fahrbahndeckenzement) und Austausch der Gesteinskörnung oder Gutachten

 $^{^{1)}}$ gilt auch für nicht beurteilte Gesteinskörnungen

Abb. 1.3.28 Zulässige Alkaligehalte von Zementen für Bauteile der Feuchtigkeitsklasse WS

Zement	Hüttensandgehalt	Alkaligehalt des Zements	Alkaligehalt des Zements ohne Hüttensand/Ölschiefer
	[M%]	Na ₂ O-Äquivalent [M%]	Na₂O-Äquivalent [M%]
CEMI + CEMII/A	_	≤ 0,80	
CEM II/B-T	_	_	≤0,90
CEM II/B-S	21 bis 29	_	≤0,90
CEM II/B-S	30 bis 35	_	≤1,00
CEM III/A	36 bis 50	_	≤1,05

²⁾ siehe Abb. 1.3.28

Gesteinskörnung

Mehlkorngehalt

Die Korngruppe 0-4 mm muss bei der Aufbereitung in der Regel aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt werden (z.B. Natursand gewaschen/Brechsand trocken und/oder Brechsand gewaschen). Die Korngruppe 0-4 mm ist wegen ihres hohen Oberflächenanteils an der Gesteinskörnung die Schlüsselkomponente für die Qualität eines Korngemischs.

Die entscheidende Rolle spielen dabei der Mehlkorngehalt (Zement, Zusatzstoffe und Anteile der Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm) und der Feinanteil (≤ 0,063 mm). Der Mehlkorngehalt darf höchstens die in Abb. 1.3.29 angegebenen Werte nach DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2

Ein optimaler Mehlkorngehalt

- erhöht die Schmierfilmmenge ohne nennenswerte Erhöhung des Anmachwassers
- gewährt eine verbesserte Verarbeitbarkeit des
- verbessert das Wasserrückhaltevermögen und verhindert das «Bluten» des Betons während und nach der Verarbeitung
- verhindert eine Entmischung beim Einbringen und erleichtert das Verdichten des Betons
- erhöht die Gefügedichte und damit die Wasserdichtigkeit
- verbessert die Wirksamkeit von Zusatzmitteln.

Dabei muss beachtet werden, dass es sich bei den Feinanteilen nicht um quellfähige Tonmineralien handeln darf.

Druckfestigkeitsklasse	Zementgehalt [kg/m³]	Höchst zulässiger Mehlkorngehalt [kg/ m³]
≤ C50/60 und LC50/55 bei den Expositionsklassen XC, XD, XS, XA		550
≤ C50/60 und LC50/55 bei den Expositionsklassen XF, XM	≤ 300 ≥ 350	400 450
≥ C55/67 und LC55/60 bei allen Expositionsklas- sen	≤ 400 450	500 550
	≥ 500	600

Die Werte sind linear zu interpolieren.

Die Werte der mittleren Zeile dürfen erhöht werden:

- wenn der Zementgehalt 350 kg/m³ übersteigt, um den über 350 kg/m³ hinausgehenden Zementgehalt, oder
- wenn ein puzzolanischer Betonzusatzstoff des Typs II verwendet wird, um den Gehalt des Zusatzstoffs,

jedoch höchstens um 50 kg/m³.

Die angegebenen Werte dürfen um 50 kg/m³ erhöht werden, wenn das Größtkorn der Gesteinskörnung 8 mm beträgt.

Zementgehalt und höchst zulässiger Mehlkorngehalt (Zement, Zusatzstoffe und Anteile der Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm) in Abhängigkeit von Druckfestigkeits- und Expositionsklasse

Gesteinskörnung

Gesteinskörnung aus rezykliertem Beton

Aufgrund der Rohstoffverknappung und der dringend gebotenen Reduktion des zu deponierenden Abfalls ist es erforderlich, rezyklierte Baustoffe als Ersatz für den wertvollen natürlichen Kies bzw. Sand weitaus stärker einzusetzen als bisher.

Prüfergebnisse und die ersten Erfahrungen zeigen, dass bei sorgfältiger Aufbereitung und bei sachgerechter Herstellung der Gesteinskörnung aus rezykliertem Altbeton (Abb. 1.3.30) und dem Ersatz der Korngruppe 0–4 mm durch Natursand ein ebenso dauerhafter Beton hergestellt werden kann wie mit herkömmlichen natürlichen Gesteinskörnungen. Diese rezyklierten Korngruppen sind in DIN 4226-100 definiert.

Der seinerzeitige Einsatz von Zusatzmitteln im Altbeton ist kein Hindernis für die Verwendung von Recycling-Gesteinskörnung, weil etwaige, von den Zusatzmitteln herrührende Rückstände gebunden werden und Luft und Boden dadurch nicht belasten können.

Die notwendigen behördlichen Vorschriften und einschlägigen Normen, Richtlinien und Empfehlungen von Fachverbänden sind vorhanden, z.B.:

- DIN-Fachbericht 100, Ziffer 5.2.3.5, rezyklierte Gesteinskörnungen
- DAfStb-Richtlinie: Beton mit rezykliertem Zuschlag
- DIN 4226-100:2002-02: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel Rezyklierte Gesteinskörnungen.

Abb. 1.3.30
Durch Rezyklierung gewonnene
Gesteinskörnung
0/32 und daraus hergestellter
Konstruktionsbeton



Abb. 1.3.31 Mehrfamilienhaus, gebaut mit Recyclingbeton



Zusatzmittel

Definition und Einleitung

Zusatzmittel für Beton sind in Wasser gelöste oder aufgeschlämmte Stoffe, die dem Beton beigemischt werden, um durch physikalische und/oder chemische Wirkungen die Eigenschaften des Frisch- oder Festbetons, wie z.B. Verarbeitbarkeit, Erhärten oder Dauerhaftigkeit, zu verändern.

verflüssiger oder Fließmittel eine gute Verarbeitbarkeit einstellen, der Kapillarporenanteil vermindern und somit

eine verbesserte Dauerhaftigkeit erzielen.

Für den Einsatz von Zusatzmitteln gibt es technologische und wirtschaftliche Gründe. So lässt sich z.B. mit dem anteiligen Ersatz von Anmachwasser durch Beton-

In DIN EN 934-2 «Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpresshilfen» werden die Zusatzmittel bezüglich Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung definiert. Ihre Verwendung ist in DIN EN 206-1, DIN 1045-2 und DIN 20000-100 geregelt.

Zusatzmittel	Abkürzung	Hauptwirkungen	Kennfarbe
Betonverflüssiger	BV	Verminderung des Wasseranspruchs und/oder Verbesserung der Verarbeitbarkeit	gelb
Fließmittel	FM	Starke Verminderung des Wasseranspruchs und/oder Beton mit fließfähiger Konsistenz (Fließbeton/SVB)	grau
Luftporenbildner	LP	Einführung gleichmäßig verteilter kleiner Luftporen zur Erhöhung des Frost- und Frosttaumittelwiderstands	blau
Verzögerer	VZ	Verzögerung des Erhärtens des Betons	rot
Erstarrungsbeschleuniger Erhärtungsbeschleuniger	BE BE	Erhärtungs-/Erstarrungsbeschleunigung des Betons Erhärtungsbeschleunigung des Betons	grün grün
Dichtungsmittel	DM	Verminderung der Kapillarwasseraufnahme	braun
Stabilisierer	ST	Erhöhung des inneren Zusammenhalts, Verbesserung der Kohäsion	violett
Zusatzmittel für Einpressmörtel	EH	Verbesserung der Fließfähigkeit, Verminderung des Wasseranspruchs und der Absetzneigung (Bluten); leichte Quellwirkung	weiß

Abb. 1.4.1 Gebräuchliche Abkürzungen und Hauptwirkungen der Zusatzmittel nach DIN EN 934-2

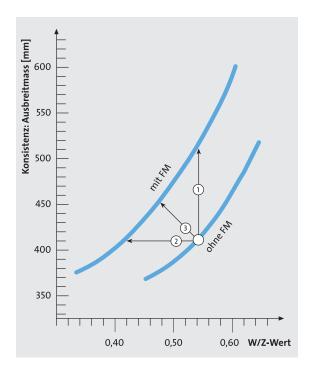
Zusatzmittel

Dosierung

Zusatzmittel werden überwiegend flüssig und in geringen Mengen zugegeben. Die Zugabemenge, bezogen auf das Zementgewicht, liegt im Allgemeinen im Bereich von 0,2 bis 2%. Die Dosierung richtet sich nach den Empfehlungen der Hersteller.

Bei Dosierungen von mehr als 3 l/m³ Beton muss die darin enthaltene Wassermenge bei der Berechnung des w/z-Werts berücksichtigt werden. Ebenso muss bei Verwendung von Luftporenmitteln der Zuwachs an eingeführter Luft im Stoffraum mitberechnet werden. Dosierungen unter 0,2 Gewichtsprozenten (2 g/kg Zement) sollten nicht verwendet werden; ansonsten sind sie in einem Teil des Zugabewassers aufzulösen. Bei diesen kleinen Mengen treten erhebliche Dosierungsungenauigkeiten auf. Unterdosierungen verringern meist deutlich den angestrebten Effekt. Überdosierungen können dagegen unerwünschte Effekte wie Erhärtungsverzögerung, Druckfestigkeitsverluste oder Entmischungen mit sich bringen.

Abb. 1.4.2 Auswirkungen von Fließmitteln



Die wichtigsten Typen von Zusatzmitteln

Verflüssiger (BV, FM)

Betonverflüssiger und Fließmittel sind die am häufigsten gebrauchten Zusatzmittel. Die Wirkung dieser Klasse von Zusatzmitteln im Beton ist in Abb. 1.4.2 anschaulich dargestellt:

Verflüssiger verbessern bei gleichem w/z-Wert die Verarbeitbarkeit des Betons ① (Abb. 1.4.2) oder vermindern bei gleicher Verarbeitbarkeit den Wasseranspruch und damit den w/z-Wert ②, was zu einer Erhöhung von Festigkeit und Dichtigkeit führt. Eine gleichzeitige Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Verminderung des w/z-Werts ist ebenfalls möglich ③. Nicht zuletzt wird ein Verflüssiger eingesetzt, um die Betonrezeptur hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Festbetoneigenschaften zu optimieren. Eine Reihe von Betonen ist ohne den Einsatz von Verflüssigern gar nicht herstellbar. So ist die praxisgerechte Herstellung von Selbstverdichtenden Betonen nur durch den Einsatz von Hochleistungsverflüssigern möglich geworden. Verwendet werden spezielle Verflüssiger und Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis (vgl. Kapitel 2.9).

Als mögliche Nebenwirkung der Verflüssiger ist die Verzögerung des Erhärtens zu nennen. Überhaupt spielen hinsichtlich der Zusatzmittelwirkungen die Eigenschaften des Zements sowie auch die Betonrezeptur eine wichtige Rolle. Deswegen ist zu empfehlen, die Auswirkungen an gegebenen Zusatzmittel-Zement-Kombinationen zu überprüfen.

Luftporenbildner (LP)

Die Aufgabe der Luftporenbildner ist es, Millionen von kleinen Luftporen mit etwa 10 bis 300 µm Durchmesser zu bilden. Dadurch wird der Frost- und Frost-Taumittelwiderstand des Betons (siehe auch Kap. 3.5) wesentlich erhöht, seine Verarbeitbarkeit verbessert und das Bluten vermindert. Ein unerwünschter Effekt ist die Abnahme der Druckfestigkeit.

Faustregel

1 Prozent zusätzlich eingeführte Luftporen ermöglicht eine Wassereinsparung von etwa 5 Litern je m³ Frischbeton und erzielt im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit die gleiche Wirkung wie etwa 10 bis 15 kg Mehlkorn.

Zusatzmittel

Faustregel

Jedes Prozent Luftporen bedeutet einen Druckfestigkeitsverlust von bis zu 3 MPa.

Im Festbeton bleiben die im Frischbeton gebildeten Poren erhalten. Sie nehmen beim Gefrieren des Betons das verdrängte Kapillarwasser zum Teil auf und vermindern dadurch die Gefahr des Zersprengens des Betons unter Eisdruck (Abb. 1.4.3).

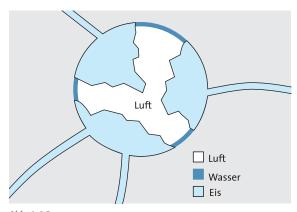


Abb. 1.4.3 Eisbildung in der Luftpore (schematisch)

Der Zielwert für den Luftgehalt im Zementstein liegt bei etwa 13 %. Für den gesamten Beton bedeutet das je nach Größtkorn Luftgehalte zwischen 3 und 8 %. Für die Einstellung der Luftgehalte genügen meist geringe Mengen an Zusatzmitteln.

Allerdings hängt die entstehende Luftporenmenge nicht allein von der Art und der Dosierung des Luftporenbildners ab, sondern auch von einer Vielzahl anderer Faktoren, wie Zementart, Gesteinskörnung und Kornzusammensetzung, Konsistenz, Temperatur, Mischintensität und Mischdauer, dem Vorhandensein anderer Zusatzmittel usw. Bei kombiniertem Einsatz von Luftporenbildner und Verflüssiger sollte der Verflüssiger erst nach dem Luftporenbildner zudosiert werden. Die Verträglichkeit neuer Kombinationen muss unbedingt durch Eignungsprüfungen nachgewiesen werden.

Verzögerer (VZ)

Verzögerer bewirken eine Verzögerung beim Erhärten des Zementleims und erlauben damit eine Verlängerung der Verarbeitung von Betonen. Ihre wichtigsten Anwendungsgebiete sind:

- Betonieren bei heißem Wetter
- Transport von Beton über große Distanzen
- Betonieren großer Kubaturen oder Flächen
- Vermeidung von Arbeitsfugen bei eingeplanten Arbeitsunterbrechungen (nahtloser Anschluss von neuem Beton an zuvor eingebrachten Beton).

Beton, der Verzögerer enthält, erhärtet zu Beginn etwas langsamer (Abb. 1.4.4). Seine 28-Tage-Festigkeit ist in der Regel etwas höher als die eines Betons, dem kein Verzögerer beigegeben wurde. Wegen seiner anfänglich langsameren Erhärtung ist ein verzögerter Beton besonders sorgfältig nachzubehandeln. Da die Wirkung stark von der Art des Verzögerers, aber auch vom verwendeten Zement und von der Temperatur abhängt, sind umfassende Eignungsprüfungen – auch bei verschiedenen Temperaturen – erforderlich. Bei Überdosierung kann die Wirkung der Verzögerer umschlagen, sie können dann zu Beschleunigern werden.



Abb. 1.4.4 Wirkung von Verzögerer und Beschleuniger auf die Betonfestigkeit

Zusatzmittel

Beschleuniger (BE)

Erstarrens bzw. Erhärtens und damit eine schnellere Wärmeentwicklung. Sie sollen für eine raschere Hydratation sorgen, um den Beton früher ausschalen, abheben, belasten oder dem Frost aussetzen zu können. Die Wirkung der Beschleuniger ist sehr von ihrer chemischen Natur, aber auch von der chemischen Zusammensetzung des Zements abhängig. Bei einer Überdosierung kann das Erstarren und Erhärten verzögert statt beschleunigt werden (Wirkung wird gegenteilig). Beschleuniger bewirken oft eine mehr oder weniger starke Herabsetzung der Endfestigkeit des Betons (Abb. 1.4.6).

Beschleuniger bewirken eine Beschleunigung des

Die früher häufig verwendeten chloridhaltigen Beschleuniger werden heute nicht mehr eingesetzt, weil sie eine ausgesprochen korrosionsfördernde Wirkung auf die Bewehrung ausüben. In Deutschland werden aus Arbeitssicherheits- und Gesundheitsgründen überwiegend alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger eingesetzt.

Wegen ihren schwer kontrollierbaren Wirkungen kommen Beschleuniger nur bei ganz spezifischen Betonanwendungen zum Zuge:

- Spritzbeton
- Betonieren bei tiefen Temperaturen
- Betonieren mit kurzen Ausschalfristen
- Betonieren in fließenden Gewässern
- Einsetzen von Ankern und Steinschrauben
- Reprofilierungen und Reparaturen
- Wasserinfiltrationen und Wassereinbrüche
- im Fertigteilwerk.

Auch wenn Zusatzmittel oft sehr erwünschte Wirkungen erzielen, darf nicht vergessen werden, dass solche Zusätze das System aus Zement, Gesteinskörnung und Wasser verkomplizieren. Deshalb ist bei Anwendung jeglicher Zusatzmittel besondere Vorsicht geboten.

Zusatzmittel verschiedener Wirkungsweise dürfen nicht miteinander vorgemischt werden, da dies zu unerwünschten Reaktionen führen kann.

Auch sollten Zusatzmittel gleicher Wirkungsweise, aber verschiedener Hersteller nicht miteinander kombiniert werden.

In jedem Fall sollte eine Erstprüfung (Eignungsprüfung) durchgeführt werden.





Die Ausgangsstoffe zur Betonherstellung

Zusatzmittel

Zusammenfassung

++ positiver Effekt

Wirkung auf		Verflüssiger BV/FM	Beschleuniger BE	Verzögerer VZ	Luftporenbildner LP
Verarbeitbarkeit		++	_	+	+
Entmischen/Blut	ten	+		_	+
Erstarren	beschleunigend		++		
	verzögernd	-		++	-
Pumpfähigkeit		+			_
Frühfestigkeit		+	++	_	_
Endfestigkeit		+	-	+	-
Permeabilität		+	_		+
Frostbeständigke	eit	+	_	_	++
Betonieren bei kaltem Wetter		+	+	_	
Betonieren bei warmem Wetter		+	_	+	

– möglicher negativer Effekt

Abb. 1.4.6 Wirkungen der vier wichtigsten Zusatzmittelgruppen



+ möglicher Effekt

Abb. 1.4.7 Zusatzmitteldosieranlage und Bindemittelwaage

Die Ausgangsstoffe zur Betonherstellung

Zusatzstoffe

Allgemeines

Zusatzstoffe sind in der Regel feinkörnige Mineralien, die bestimmte Eigenschaften des Betons verbessern können. Dies sind vorrangig die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und die mechanischen Eigenschaften sowie die Dichtigkeit des Festbetons. Manche Zusatzstoffe dienen auch der Verminderung der Wärmeentwicklung während Erhärtens des Betons. Im Gegensatz zu Betonzusatzmitteln ist die Menge der dem Beton zugegebenen Zusatzstoffe so groß, dass sie bei der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen ist.

Manche Zusatzstoffe werden bereits im Zementwerk durch gemeinsames Vermahlen mit dem Klinker oder durch Mischen in den Zement eingebracht. Dafür sprechen gute Gründe, denn dadurch wird sowohl eine genaue und gleichbleibende Dosierung wie auch eine homogene Verteilung der Zusatzstoffe erreicht. Zement und Zusatzstoff sind in einem präzise definierten und normgerechten Zementsystem integriert, das bei der Berechnung des w/z-Werts und des Mindestzementgehalts als Ganzes angesehen wird. Beispiele dafür sind die Holcim-Zemente der Reihen Ferro, Duo, Aqua und Trass.

Oft werden Zusatzstoffe erst im Transportbetonwerk der Mischung zugefügt. Dies hat den Vorteil, dass man das Verhältnis von Zusatzstoff zu Zement frei wählen und damit den Anforderungen anpassen kann, die an eine bestimmte Betonrezeptur gestellt werden.

Allerdings sind damit auch einige Nachteile verknüpft. Die getrennte Lagerung der Zusatzstoffe verlangt zusätzliche Silos und Dosiereinrichtungen sowie zusätzliche Kontrollen. Manche Zusatzstoffe neigen bei längerer Lagerung zur Knollenbildung. Die Herstellung eines homogenen Frischbetons kann eine längere Mischdauer erfordern. Die DIN EN 206-1 unterscheidet zwei Typen von Betonzusatzstoffen.

Zusatzstoffe des Typs I sind inerte Stoffe (z.B. Gesteinsmehl, Pigmente), die keine chemische Bindung eingehen. Als Zusatzstoff des Typs II werden latent hydraulische und puzzolanische Stoffe wie Hüttensandmehl bzw. Steinkohlenflugasche bezeichnet, die dank ihrer Reaktivität zur Festigkeitsbildung des Zementsteins beitragen (Abb. 1.5.1).

Abb. 1.5.1 Einteilung der Zusatzstoffe

	Bezeichnung	Chemische Reaktion	Wirkung	Zusatzstoffe			
Two I DIN FN 206	Inert	Keine oder höchstens oberflächliche Reaktion	Füllereffekt, d.h. vermindert Porosität und verbessert Verarbeitbarkeit	Kalksteinmehl Quarzmehl			
- -	<u>.</u>		Überbrückt Risse	Fasern aller Art			
	2		Färbt	Pigmente			
	Puzzolanisch	Reaktion mit Calcium-	Vermindert Porosität	Steinkohlenflugaschen			
		hydroxid und Wasser unter Bildung von	Erhöht Dauerhaftigkeit	Silicastaub			
		zementhydratähnlichen	Vermindert Frühfestigkeit	Natürliche und thermisch			
		Stoffen	Senkt Hydratationswärme	aktivierte Puzzolane			
٧	3		Erhöht Endfestigkeit				
Tyn II DIN EN 206	Latent hydraulisch	In Gegenwart von	Vermindert Porosität	Hüttensandmehl			
2		Anregern (Alkali, Kalk, Sulfat) und Wasser erfolgt	Erhöht Dauerhaftigkeit				
= 2 2		Bildung von zement-	Vermindert Frühfestigkeit				
		hydratähnlichen Stoffen	Senkt Hydratationswärme				
			Erhöht Endfestigkeit				
	Hydraulisch	Reaktion mit Wasser unter Bildung von zement- hydratähnlichen Stoffen	Verbessert Verarbeitbarkeit, Füllereffekt, d.h. vermindert Porosität	Hydraulischer Kalk			

Zusatzstoffe

Einteilung

Die übliche Einteilung der Zusatzstoffe richtet sich, wie Abb. 1.5.1 zeigt, nach ihrem chemischen Verhalten im Zementleim und/oder nach ihrer Wirkung im Beton.

Eine weitere Einteilung der Zusatzstoffe bezieht sich auf deren chemische Zusammensetzung (siehe dazu das Dreistoffdiagramm Abb. 1.1.17 in Kap. 1.1 «Zemente»).

Inerte Zusatzstoffe

Kalkstein- und Quarzmehl

Kalkstein- und Quarzmehl verbessern aufgrund ihrer geringen Korngröße, ihrer Kornzusammensetzung und Kornform den Kornaufbau des Betons im Mehlkornbereich. Sie werden zugesetzt, um beispielsweise bei Gesteinskörnungen mit mehlkornarmen Sanden einen für die Verarbeitbarkeit und für ein geschlossenes Gefüge ausreichenden Mehlkornanteil einzubringen. Kalksteinund Quarzmehl sollten auf ihre Eignung für den vorgesehenen Zweck geprüft werden.

Fasern

Fasern als Betonzusatzstoffe können aus verschiedenen Materialien bestehen, Stahl, Kunststoff oder Glas (Abb. 1.5.2-4). Stahlfasern sind die in der Praxis am häufigsten eingesetzten Fasern.

Gleichmäßig im Beton verteilte Stahlfasern verbessern dessen Verhalten unter Biegezugbeanspruchung (z.B. Verformbarkeit, Duktilität, Biegezugfestigkeit).

Weiterhin wirken sie sich günstig auf den Verschleißwiderstand, die Grünstandsfestigkeit und das Verhalten bei dynamischer Beanspruchung aus. Ihre erfolgreiche Anwendung setzt eine auf die konkrete Bauaufgabe ausgerichtete Planung und Beratung durch einen spezialisierten Ingenieur voraus. Der Deutsche Beton- und Bautechnik Verein (DBV) hat dazu das DBV-Merkblatt «Stahlfaserbeton» herausgegeben.

Entscheidende Neuerung ist die Einführung von Faserbetonklassen. Der Planer wird dadurch in die Lage versetzt die statisch erforderlichen Materialeigenschaften durch Festlegen der Faserbetonklasse anzugeben (siehe auch Kapitel Stahlfaserbeton).

Der Hersteller eines solchen Stahlfaserbetons muss dafür Sorge tragen, dass die Materialeigenschaften sicher erreicht werden. Dies geschieht durch erweiterte Erstprüfungen, da die Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton von vielen Faktoren beeinflusst wird. Sie ist u.a. abhängig vom Fasertyp, der Faserschlankheit, dem Fasergehalt sowie der gleichmäßigen Verteilung der Fasern im Beton.

Der erforderliche Stahlfasergehalt bewegt sich in weiten Grenzen. Als Anhaltspunkt kann von 20 bis 50 kg Stahlfasern pro Kubikmeter Beton ausgegangen werden. Die Zugabe von Stahlfasern zur Betonmischung benötigt besondere Dosiervorrichtungen, um eine homogene Verteilung sicherzustellen. Die Zugabe von Stahlfasern führt in der Regel zu steiferen Konsistenzen. Eine gute Verarbeitbarkeit ist durch betontechnologische Maßnahmen sicherzustellen. Dies kann z.B. durch den Einsatz eines Fließmittels erfolgen.

Polypropylenfasern, die meist verwendeten organischen Fasern, werden dem Beton beigemischt, um Frühschwindrisse zu vermeiden. In Beton mit erhöhtem Feuerwiderstand werden sie zur Abminderung des Wasserdampfdrucks im Zementstein eingesetzt (siehe Kap. 3.9).

Pro Kubikmeter Beton sind etwa 1 kg Fasern notwendig. Das Einmischen geschieht relativ einfach und erfordert keine speziellen Vorkehrungen oder Einrichtungen.







Abb. 1.5.2 (links) Verschiedene Arten von Stahlfasern

Abb. 1.5.3 (mitte) Polypropylenfasern

Abb. 1.5.4 (rechts) Glasfasern, geschnitten und gebündelt

Die Ausgangsstoffe zur Betonherstellung

Zusatzstoffe



Abb. 1.5.5 Mit Pigmenten eingefärbte Betonsteine aus Weißzement (Holcim-White)

Anorganische Pigmente

Anorganische Pigmente werden zum Einfärben von Beton und Mörtel verwendet (Abb. 1.5.5). Den hohen Anforderungen bezüglich Beständigkeit und Korngrößenverteilung genügen praktisch nur Oxidpigmente.

Pigmente haben keine chemische Wirkung im Beton. Wegen ihres meist höheren Wasserbedarfs bedingen sie einen höheren Wasserzementwert, sofern dieser Effekt nicht durch den Einsatz eines Fließmittels kompensiert wird.

Die Herstellung einwandfrei gefärbter Bauteile bedarf großer Erfahrung. Eine homogene Betonmischung sowie geeignete Ausgangsstoffe sind Voraussetzung, um gleichmäßig gefärbte, helle Betonoberflächen zu erzielen. Als Zemente eignen sich insbesondere die hellen Hochofenzemente (Holcim-Duo, Holcim-Aqua) oder Weißzement (Holcim-White). Es sollten zudem helle Sande verwendet werden. Die Farbe des Kieses spielt hingegen eine untergeordnete Rolle.

Die Pigmentdosierung, meist wenige Prozente bezogen auf die Zementmasse, richtet sich nach der gewünschten Farbintensität und wird vom Lieferanten angegeben. Reste von gefärbtem Beton müssen sorgfältig aus Mischer, Transportfahrzeug und Umschlaggeräten entfernt werden, um die nachfolgenden Betonchargen nicht zu verunreinigen.

Auch die besten Farbpigmente verhindern nicht, dass die Farbe des Betons mit der Zeit etwas stumpfer wird.

Abb. 1.5.6 Maximale Zusatzstoffmengen des Typs II zur Gewährung der Alkalität und der Anrechenbarkeit auf den Wasserzementwert und den Mindestzementgehalt

	Flugasche (f)	Silicastaub (s)	Flugasche und Silicastaub
Maximaler Zusatzstoffgehalt zur	$s_{max} = 0.11 \cdot z^{1}$	$s_{max} = 0.11 \cdot z$	$s_{max} = 0.11 \cdot z$
Gewährung der Alkalität			$f_{\text{max}}^{2)} = 0.66 \cdot z - 3 \cdot s$
			$f_{\text{max}}^{3)} = 0.45 \cdot z - 3 \cdot s$
Anrechenbare Zusatzstoffmenge	$f_{max} = 0.33 \cdot z^{4}$	$s_{max} = 0.11 \cdot z$	$f_{max} = 0.33 \cdot z \text{ und}$
auf den Wasserzementwert	$f_{max} = 0.25 \cdot z^{5}$	$s + z \ge z_{min}$	$s_{max} = 0,11 \cdot z$
	$f_{max} = 0,15 \cdot z^{(6)}$		$f + s + z \ge z_{min}$
	$f + z \ge z_{min}$		
k-Wert			$k_f = 0.4$
	k _f = 0,4	k _s = 1,0	k _s = 1,0
Äquivalenter			
Wasserzementwert w/z _{eq} 8)	$w/(z + k_f \cdot f)$	$W/(z + k_s \cdot s)^{7}$	$w/(z + k_f \cdot f + k_s \cdot s)^{7}$
Reduzierter Mindestzementgehalt 8)	240 kg/m³ bei XC1, XC2 und X0 mindestens der Zement-Verrin	-	•
Zulässige Holcim-Zementarten	CEMI	CEM I	CEM I
	CEM II-S	CEM II-S	CEM II-S
	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A
	CEM III/B (mit $S_{max}^{9} \le 70\%$)	CEM III/B	

Zementgehalt z, Flugaschegehalt f und Silicastaubgehalt s, alle in kg/m

- 1) für Zemente mit D
- 3) für CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM III/A und andere (s. DIN 1045-2)
- 6) für Zemente mit D
- 7) für alle Expositionsklassen außer XF2 und XF4
- 8) Die Anrechnung auf den Mindestzementgehalt und den w/z-Wert ist nur bei Verwendung von f zulässig. Bei gleichzeitiger Zugabe von f + s ist eine Anrechnung auch für f ausgeschlossen.
- 9) S=Hüttensandgehalt

- 4) für Zemente ohne P, V und D
- 5) für Zemente mit P oder V ohne D

Für die Verwendung von Flugasche in Unterwasserbeton gilt: $(z + f) \ge 350 \text{ kg/m}^3$; $w/z_{eq} = w/(z + 0.7 \cdot f) \le 0.60$

Zusatzstoffe

Puzzolanische Zusatzstoffe

Allen puzzolanischen Zusatzstoffen ist gemein, dass sie im erhärtenden Beton in Gegenwart von genügend Wasser langsam mit dem aus dem Zement abgespaltenen Calciumhydroxid reagieren, zementhydratähnliche Stoffe bilden und dadurch zur Festigkeitsbildung beitragen. Diese puzzolanische Reaktion verringert die Betonporosität und verbessert damit die Dauerhaftigkeit des Betons. Betone mit puzzolanischen Zusätzen (ausgenommen Silicastaub) erhärten etwas langsamer als solche ohne, besonders bei tiefer Temperatur. Nachbehandlungsdauer und Ausschalfristen sind gegebenenfalls angemessen zu verlängern.

Um eine ausreichende Alkalität der Porenlösung bei Stahl- und Spannbeton zu gewährleisten, sind maximale Mengen puzzolanischer Zusatzstoffe vorgegeben (DIN 1045-2). Ebenso ist in der Norm die Anrechenbarkeit der Zusatzstoffe des Typs II auf den Wasserzementwert sowie den Mindestzementgehalt mit einem k-Wert-Ansatz geregelt (Abb. 1.5.6).

Steinkohlenflugaschen

Steinkohlenflugaschen fallen als Nebenprodukt in thermischen Kraftwerken an. Ihre Qualität hängt von der verwendeten Kohle sowie von der Art des Kraftwerks und seiner Betriebsweise ab und kann deshalb in weiten Grenzen schwanken. Die Verwendung von Steinkohlenflugasche aus verlässlicher Herkunft hat sich jedoch als Betonzusatz bewährt.

Die Anforderungen an Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff sind in DIN EN 450 geregelt.

Die meist hohe Feinheit der Steinkohlenflugaschen und deren charakteristische kugelige Kornform (Abb. 1.5.7) bewirken eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Auch die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit des Betons werden erhöht, wenn eine Steinkohlenflugasche von hoher puzzolanischer Aktivität mit der gebotenen Sorgfalt bezüglich Betonzusammensetzung und Nachbehandlung verwendet wird. Da Steinkohlenflugaschen die Hydratationswärmeabgabe der erhärtenden Betone reduzieren, lassen sich mit ihr in massigen Betonbauteilen Temperaturspitzen vermindern.

Silicastaub

Silicastaub, auch Kieselsäurestaub oder Mikrosilica genannt, entwickelt wegen seiner extrem hohen Feinheit und seines sehr hohen Kieselsäuregehalts eine sehr große puzzolanische Aktivität.

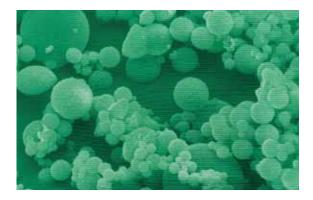


Abb. 1.5.7 Charakteristische Kornform von Steinkohlenflugasche (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme)



Abb. 1.5.8 Stark belastete Stütze aus Hochleistungsbeton

Mit einer auf die Zementmasse bezogenen Dosierung von 5 bis 10% Silicastaub lassen sich nachhaltige Verbesserungen der Betoneigenschaften erzielen:

- gesteigerte Kohäsion und stark erhöhtes Wasserrückhaltevermögen im Frischbeton, dadurch keine Entmischung
- Verminderung des Rückpralls beim Spritzbeton
- bedeutende Erhöhung der Betonfestigkeit; erlaubt die Herstellung von hochfestem Beton
- erhebliche Verminderung der Betonporosität, damit eine wesentliche Verbesserung der Dauerhaftigkeit: erhöhter Widerstand gegen Frost-, Frosttaumittel- und Sulfatangriff sowie gegen andere chemisch aggressive Stoffe
- verlangsamter Karbonatisierungsfortschritt, damit verbesserter Korrosionsschutz der Bewehrung.

Die Ausgangsstoffe zur Betonherstellung

Zusatzstoffe

Die Zugabe von Silicastaub zur Betonmischung verschlechtert deren Verarbeitbarkeit und verändert nachhaltig deren rheologische Eigenschaften (Fließeigenschaften). Durch den Zusatz besonderer Fließmittel lässt sich eine ausreichende Verarbeitbarkeit erzielen. Um unangenehme Überraschungen beim Einbringen des Frischbetons zu vermeiden, sind Versuche zur Verarbeitbarkeit erforderlich.

Infolge seiner extremen Feinheit kann Silicastaub gewisse Probleme bei der Dosierung und bei der Homogenisierung der Betonmischung verursachen. Bei nicht sachgerechter Handhabung kann sich eine übermäßige Feinststaubentwicklung einstellen. Je nach gegebenem Fall lassen sich diese Probleme mit drei unterschiedlichen Arten des Angebots vermeiden:

- als in den Zement integrierter Bestandteil
- als Silicastaub-Slurry (in Wasser aufgeschlämmtes Produkt)
- als granulierter Silicastaub.

Silicastaub wird in Deutschland vorwiegend im Spritzbeton sowie im Hochleistungsbeton eingesetzt. Abb. 1.5.6 gibt Auskunft über die dabei maximal anrechenbaren Mengen auf den Mindestzementgehalt und den Wasserzementwert.

Natürliche Puzzolane

Zu den natürlichen Puzzolanen zählt u.a. der Trass, ein natürliches Gestein meist vulkanischen Ursprungs. Seine puzzolanische Wirkung war schon den römischen Baumeistern bekannt.

Trass als Betonzusatzstoff ist in DIN 51034 geregelt. Trass verbessert die Verarbeitungseigenschaften von Beton und kann dessen Ausblühneigung reduzieren.

Latent hydraulische Zusatzstoffe

Latent hydraulische Stoffe benötigen, anders als die Puzzolane, nicht das ${\rm Ca(OH)_2}$ aus der Zementhydratation als ständigen Reaktionspartner. Sie reagieren schon in Gegenwart geringer Mengen sogenannter Anreger wie z.B. alkalischen Stoffen oder Sulfaten. Gemeinsam mit Wasser reagieren sie dann unter Bildung von zementhydratähnlichen Stoffen und verfestigen sich wie Zement.

Hüttensande

Hüttensand (wie in Kap. 1.1 beschrieben) kann wie kein anderer Zusatzstoff Zementklinker in einer Betonmischung nahezu vollständig ersetzen. Wegen der notwendigen, relativ aufwendigen Investitionen zur Aufbereitung der Hochofenschlacke ist hochwertiger Hüttensand jedoch nur beschränkt auf dem Markt verfügbar. Um die günstigen Eigenschaften des Hüttensandes zu nutzen, empfiehlt es sich, hüttensandhaltige Portlandhüttenzemente oder Hochofenzemente zu verwenden (Kap. 1.1). Im Unterschied zur Steinkohlenflugasche existiert bisher auch nur ein Normenentwurf (DIN EN 15167) für Hüttensand als Betonzusatzsoff. Für seine Verwendung ist daher eine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung erforderlich.



Zusammensetzung des Betons

Die Zusammensetzung des Betons bestimmt maßgeblich seine Eigenschaften. So können über Art und Mengenanteil der fünf Komponenten Zement, Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzstoffe und Zusatzmittel Betone für die verschiedensten Bauaufgaben hergestellt werden.

Beton soll im Allgemeinen eine Nutzungsdauer von 50 Jahren gewährleisten. Neben den spezifischen Eigenschaften wie zum Beispiel Festigkeit oder Wasserdichtigkeit ist deshalb die Dauerhaftigkeit eines Betons besonders wichtig. Das bedeutet, dass der Beton so fest, dicht und beständig gegen den Angriff aus seiner Umgebung sein soll, dass seine Gebrauchstauglichkeit für die gesamte Nutzungsdauer erhalten bleibt. Darüber hinaus sollte die während des Erhärtungsprozesses des Zements entstehende Alkalität des Betons dauerhaft erhalten bleiben (Kap. 1.1 «Zement»), um die Betonbewehrung sicher vor Korrosion zu schützen.

Die Dauerhaftigkeit des Betons wird von seiner Zusammensetzung, aber auch von seiner Herstellung, Verarbeitung bzw. Verdichtung und seiner Nachbehandlung bestimmt. In Abb. 2.1.1 sind die wichtigsten Kriterien der Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken und ihre Einflussgrößen aufgeführt.

Die Mindestanforderungen an die Zusammensetzung des Betons sind in DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 entsprechend seiner geplanten Nutzung festgelegt, wie in Kap. 2.2 «Einteilung des Betons» beschrieben wird.

Abb. 2.1.1 Kriterien der Dauerhaftigkeit des Betons. Steuergrößen und Auswirkungen

Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken	Steuergrößen	Auswirkung
statisch ausreichende Druckfestigkeit	abgestimmte stetige Kornzusammensetzung niedriger w/z-Wert	hohe Packungsdichte der Gesteinskörnung Verringerung des Wasseranspruchs und des Hohlraumvolumens
hohe Dichtheit und Alkalität (Korrosionsschutz für Bewehrung)	niedriger w/z-Wert Verwendung von Betonver- flüssigern oder Fließmitteln	Verminderung des Wassergehalts im Beton und damit der Porosität des Zementsteins Erhöhung der Druckfestigkeit und Dichtheit des Betons
Undurchlässigkeit gegenüber schädigenden Medien	Einsatz von hüttensandhaltigen Zementen oder Zusatzstoffen wie Steinkohlenflugasche, Silicastaub	Nachverdichtung und -erhärtung des Zementsteins durch latenthydraulische oder puzzolanische Reaktion Verbesserung der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung durch Silicastaub
Widerstand gegenüber Angriffen aus der Umgebung (Frost,	gute Homogenisierung durch ausreichend lange und wirksame Mischzeit	optimale Ausnutzung aller Betonkomponenten
Taumittel, chemische Stoffe)	Einführung künstlicher Luftporen (Luftporenbildner)	Widerstand gegen Frost und Taumittel
	Verwendung von HS-Zementen mit hohem Sulfatwiderstand (Holcim-Sulfo, Holcim-Aqua)	Widerstand gegen Angriff sulfathaltiger Lösungen
Dagrangung dar Cabusin dan inung	optimale Verdichtung des Betons	Dichtes Betongefüge ohne Entmischungen Verringerung des Verdichtungsporenanteils
Begrenzung der Schwindneigung des Betons zur Reduktion der Rissbildungsgefahr	ausreichende Nachbehandlung	optimale Hydratation des Zements, Dichtheit insbesondere der Betonoberfläche (Angriffsfläche aller Medien)
Reduktion der Rissbildungsgefahr durch Temperaturspannungen	Verwendung von LH-Zementen mit niedriger Hydratationswärme (Holcim-Duo, Holcim-Aqua)	Verhinderung von hohen Temperaturunterschieden innerhalb des Betons insbesondere bei massigen Bauteilen

Zusammensetzung des Betons

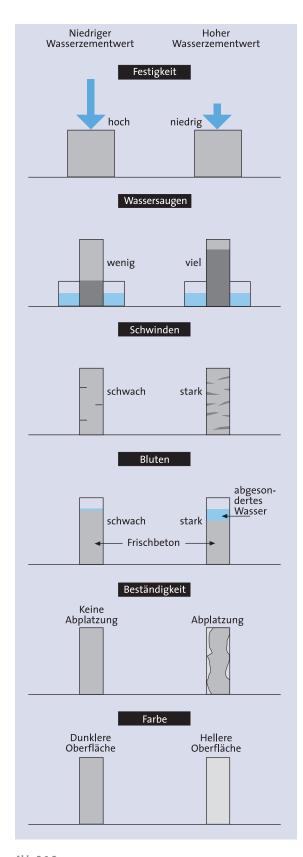


Abb. 2.1.2
Einfluss des w/z-Werts auf Betoneigenschaften

Bedeutung des Wasserzementwerts

Ein zentraler Kennwert des Betons ist sein Wasserzementwert (Abb. 2.1.2 bis 2.1.4). Um den frischen Beton gut verarbeiten zu können, muss bei der Herstellung im Allgemeinen mehr Wasser zugegeben werden, als für die Hydratation des Zements erforderlich ist. Dieses so genannte Überschusswasser wird nicht chemisch gebunden und führt zur Kapillarporosität des Zementsteins. Maßgebend für die Gesamtporosität des Zementsteins ist jedoch nicht die absolute Wassermenge, sondern das Verhältnis des Wasser- und Zementgehaltes im Frischbeton. Dieses Verhältnis wird als Wasserzementwert w/z bezeichnet. Über den Wasserzementwert können die wesentlichen Festbetoneigenschaften maßgeblich beeinflusst werden.

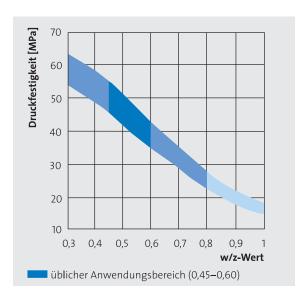


Abb. 2.1.3 Einfluss des w/z-Werts auf die 28-Tage-Druckfestigkeit von Beton bei Verwendung eines CEM I 42,5 N

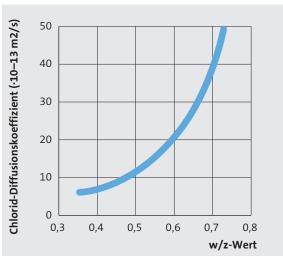


Abb. 2.1.4 Einfluss des w/z-Werts auf den Chloriddiffusionskoeffizienten bei einem 28-tägigen Beton

Zusammensetzung des Betons

Wahl des Wasserzementwerts

Die Festlegung des Wasserzementwerts richtet sich vor allem nach den Umweltbelastungen und der Traglast, denen der erhärtete Beton ausgesetzt sein wird. Die konkreten Anforderungen ergeben sich aus den Bestimmungen der DIN EN 206-1 und der DIN 1045-2, auf die im nächsten Kapitel eingegangen wird.

Zement benötigt rund 40% seiner Masse an Wasser, um vollständig hydratisieren zu können. Dies entspricht einem w/z von 0,40. Wasser, das darüber hinaus dem Beton zugegeben wird, führt zur Bildung von Kapillarporen.

Abb. 2.1.5
Schlechte Raumverfüllung, hohe
Porosität
bei Beton mit nur
einer Korngruppe
(schematische
Darstellung)

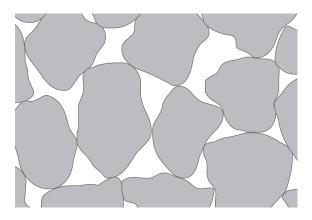
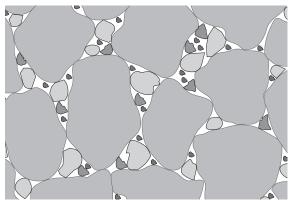


Abb. 2.1.6 Gute Raumverfüllung, niedrige Porosität bei Beton mit gut abgestuftem Korngemisch (schematische Darstellung)



Mindestzementgehalt im Beton

Bei ausreichendem Zementgehalt wird während der Hydratation so viel Calciumhydroxid gebildet, dass durch dessen hohe Alkalität die Stahlbewehrung zuverlässig vor Korrosion geschützt wird. In DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 wird der Mindestzementgehalt in Abhängigkeit von der geplanten Exposition vorgegeben (Abb. 2.2.2). Dieser Mindestzementgehalt darf nicht unterschritten werden. Für besondere Anwendungen ist es jedoch erforderlich, einen höheren Zementgehalt zu wählen, um im Frisch- oder Festbeton zusätzliche Eigenschaften zu erhalten. So empfiehlt sich eine Anhebung des Zementgehalts bei Beton mit erhöhten Anforderungen an die Sichtfläche (Kap. 2.16), bei Pumpbeton (Kap. 2.10) oder selbstverdichtendem Beton (Kap. 2.12). Auch bei Verwendung von splittiger anstelle einer runden Gesteinskörnung ist die Erhöhung der Zementleimmenge erforderlich.

Wahl der Gesteinskörnung

Ein Korngemisch mit wohlabgestimmter, kontinuierlicher Kornzusammensetzung führt zu einem Beton mit guter Verarbeitbarkeit und geringer Entmischungsneigung. Der Wasseranspruch des Korngemischs als auch der für eine gute Verarbeitbarkeit erforderliche Zementleimgehalt werden begrenzt (Abb. 2.1.5 und 2.1.6). Der daraus resultierende Festbeton hat dadurch eine niedrige Porosität, was ihm eine hohe Dauerhaftigkeit verleiht.

Korngemische mit Ausfallkörnungen sind deshalb nur dann zu verwenden, wenn damit andere Vorteile wie z.B. eine verbesserte Pumpbarkeit erzielt werden können.

Zusammensetzung des Betons

Stoffraumrechnung

Die Stoffraumrechnung dient zur Ermittlung der Raumanteile der einzelnen Ausgangstoffe an einem Kubikmeter (1 m³ = $1000 \, dm³$) verdichteten Frischbeton. Die Raumanteile werden aus dem Quotienten der Massen [kg] und der Dichten [kg/dm³] der jeweiligen Ausgangsstoffe berechnet.

$$1000 \,\mathrm{dm^3} = \frac{z}{\rho z} + \frac{w}{\rho w} + \frac{g}{\rho g} + \frac{f}{\rho f} + P$$

z, ρz : Masse bzw. Dichte des Zementes w, ρw : Masse bzw. Dichte des Wassers

g, ρg : Masse bzw. Rohdichte der

f, ρf : Masse bzw. Dichte des Zusatzstoffes

P: Porenvolumen (Luftgehalt)

Gesteinskörnung

In der Praxis wird nun folgender Ansatz verfolgt: Zum Erreichen bestimmter Frisch- und Festbetoneigenschaften müssen entsprechende Anforderungen erfüllt werden. So erhält man den benötigten Wassergehalt für eine Konsistenz aus der Sieblinie der eingesetzten Gesteinskörnung z.B. nach dem k-Wert Verfahren (siehe Abb. 2.1.8).

Sollen verflüssigende Zusatzmittel eingesetzt werden, muss der ermittelte Wassergehalt angepasst oder aus bestehenden Erfahrungswerten gewonnen werden. Im nächsten Schritt ist der Wasserzementwert w/z zu wählen. Dies geschieht in Abhängigkeit der anvisierten Betondruckfestigkeit in der Regel mit Hilfe des Walz-Diagrammes (siehe Abb. 2.1.9). Zu beachten sind dabei in jedem Fall die Anforderungen, die sich aus den Expositionsklassen nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 ergeben.

In diesem Zusammenhang sind auch weitere Grenzwerte der Betonzusammensetzung, wie z.B. Mindestzementgehalt, anrechenbarer Steinkohlenflugaschegehalt, Mindestluftporengehalt oder der höchstzulässige Mehlkorngehalt einzuhalten.

Für verdichtete Frischbetone ohne luftporenbildende Zusatzmittel kann ein Porenvolumen von 1 bis 2 Vol.-% angenommen werden. Flüssige Zusatzmittel sind auf den Wasserzementwert anzurechnen, wenn ihr Gehalt 3 Liter/m³ überschreitet.

Der verbleibende Stoffraum wird nun durch die Gesteinskörnung aufgefüllt. Die Stoffraumrechnung wird grundsätzlich für oberflächentrockene Gesteinskörnung durchgeführt.

Abb. 2.1.7 verdeutlicht einen möglichen Rechengang. Berechnet wird ein Beton nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 mit den Anforderungen C30/37, XC4, XD3, XF4 D_{max} 32; CI 0,20; F3.

Vorgabe DIN EN 206-1/	Ausgangsstoff	Masse	Dichte	Stoffraum	Rechenweg
DIN 1045-2		[kg]	[kg/dm³]	[dm³]	
Beton für Expo-	Zement	360	3,1	116	360 : 3,1 = 116
sitionsklasse XC4 XD3 XF4	Wassergehalt	162	1,0	162	360 · 0,45 = 162
ACT ADS ATT	Fließmittel (FM) 1,0 M% v.ZG.	3,6	1,1	3,3	3,6:1,1=3,3
Anforderungen: Mindestdruck- festigkeitsklasse:	Luftporenbildner (LP) 0,2 M% v.ZG.	0,72	1,0	0,72	0,72 : 1,0 = 0,72
C 30/37	Luftporen			40	
	Zementleim			322	116 + 162 + 3,3 + 0,72 + 40 = 322
$z_{min} = 320 \text{ kg/m}^3$ max w/z = 0.45	Gesteinskörnung *)	1797	2,65	678	1. Schritt: 1000 - 322 = 678 2. Schritt: 678 · 2,65 = 1797
	Zugabewasser *)	157			162 - 3,6 - 0,72 = 157,68 = 157
Mindestluftporen- gehalt: 4,0 Vol%			Summe	1000	

^{*)} Die verwendete Gesteinskörnung ist in der Regel oberflächenfeucht (Sand ca. 4-6 M.-%, Kies ca. 1-4 M.-%). Bei der Herstellung des Betons ist dies bei der Kieseinwaage durch Addition und bei der Zugabewasserermittlung durch Subtraktion zu berücksichtigen.

Abb. 2.1.7
Schema zur
Berechnung der
Komponenten für
einen Kubikmeter
verdichteten
Betons nach
DIN EN 206-1
und DIN 1045-2,
C30/37;
XC4, XD3, XF4;
D_{max}32; CI 0,20; F3

Zusammensetzung des Betons

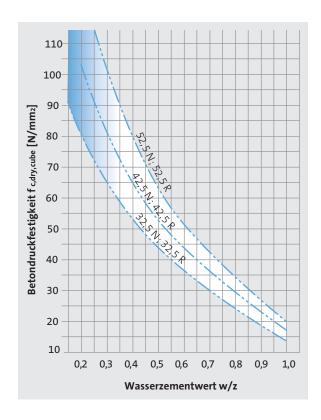
Abb. Abb. 2.1.8 Wasseranspruch in kg/m³ Frischbeton für verschiedene Konsistenzbereiche (Richtwerte)

Sieblinie	Körnungsziffer 1)	D-Summe ²⁾	Konsistenzbezeichnungen			
			steif	plastisch	weich ³⁾	
A 32	5,48	352	130	150	170	
B 32	4,20	480	150	170	180	
C 32	3,30	570	170	190	210	
A 16	4,60	440	140	160	180	
B 16	3,66	534	160	180	200	
C 16	2,75	625	190	210	230	
A 8	3,64	536	155	180	200	
B 8	2,89	611	190	205	230	
C 8	2,27	673	210	230	250	

¹⁾ Körnungsziffer: Summe der in Prozent angegebenen Rückstande auf den Sieben 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5 und 63 mm, geteilt durch 100.

Der Wasseranspruch ist zusätzlich abhängig vom Mehlkorngehalt, der Kornform sowie der Rauigkeit der Kornoberfläche. Er kann in ungünstigen Fällen bis zu 20 kg/m³ Frischbeton höher liegen.

Abb. 2.1.9 Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit vom w/z-Wert für Zemente unterschiedlicher Festigkeitsklasse (Richtwerte)



²⁾ D-Summe: Summe der in Prozent angegebenen Durchgänge durch die Siebe 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5 und 63 mm.

³⁾ Beton weicherer Konsistenz nur durch den Einsatz von Fließmittel

Einteilung des Betons

Festlegung der Betone nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2

Verantwortung

DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 sind Produktnormen, die die Herstellung, die Lieferung und den Konformitätsnachweis von Beton zum Inhalt haben. Sie definieren die Anforderungen an die Ausgangsstoffe, die Festlegung des Betons, die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton und deren Nachweis, die Verfahren der Produktionskontrolle, die Konformitätskriterien sowie die Beurteilung der Konformität. Die Normen gelten für alle vollständig verdichteten Betone, von Normalbeton, Leichtbeton bis Schwerbeton, jedoch nicht für Spezialbetone.

Gemäß der Norm kann Beton grundsätzlich nach Eigenschaften oder nach Zusammensetzung hergestellt werden. Dabei werden die Verantwortlichkeiten aufgeteilt in die der Ausschreibenden – im Wesentlichen also Architekten, Planer und Ingenieure –, in die der Betonhersteller und in die der bauausführenden Firmen (Abb. 2.2.1):

- Beton nach Eigenschaften: Kunde bestellt Eigenschaften, Transportbetonwerk stellt sicher, dass diese erreicht werden
- Beton nach Zusammensetzung: Kunde bestellt Zusammensetzung, Transportbetonwerk stellt sicher, dass diese eingehalten wird
- Standardbeton (früher Rezeptbeton): Eine Erstprüfung entfällt, Standardbeton ist baupraktisch bedeutungslos.

Durch die Übernahme der Alkali-Richtlinie in die DIN 1045-2 (A2-Änderung) ergeben sich neue Zuständigkeiten (Abb. 2.2.2).

Die Planenden haben neben der Festlegung der Expositionsklassen zusätzlich die Aufgabe, die Feuchteklasse für «Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion» auszuweisen.

Produzenten von Gesteinskörnung stufen ihre Gesteinskörnungen in Alkaliempfindlichkeitsklassen ein. Die Zementhersteller bieten NA-Zemente an.

Die Betonhersteller stellen durch die Auswahl der geeigneten Zemente und Gesteinskörnungen sicher, dass die Anforderungen der Richtlinie eingehalten werden. Die Feuchteklassen müssen auf dem Lieferschein angeben

Festlegen des	Beton nach	Beton nach				
Betons	Eigenschaften	Zusammensetzung				
Festlegen der	Verfassende,	Ausschreibende				
Anforderungen	(Planende, Ingenieure, Architekten)					
Betonzusammensetzung	Betonherstellende	Verfassende,				
Erstprüfung	(Transportbetonwerke, Baustellenanlagen)	Ausschreibende				
Produktionskontrolle	Betonhe	erstellende				
Konformität	Betonherstellende	Herstellende/Verfassende				
Annahmeprüfung	Betonverarbeitende (Bauunternehmen)					

Verantwortlichkeiten für die Festlegung des Betons nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2

Maßnahme	Zuständigkeit
Festlegung der	
Feuchtigkeitsklassen	Verfasser der Festlegung
Einstufung in	
Alkaliempfindlichkeitsklasse	Produzent der Gesteinskörnung
Begrenzung des Alkaligehalts	
im Zement	Zementhersteller
Anpassung der Rezeptur	
Angabe der	
Feuchtigkeitsklasse	Betonhersteller

Abb. 2.2.2

Maßnahmen und Zuständigkeiten zur Vermeidung von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen

Einteilung des Betons

Beton nach Eigenschaften

Der Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 wird anhand seiner Eigenschaften eindeutig gekennzeichnet und festgelegt. Dazu wird nicht nur die rechnerisch erforderliche Druckfestigkeit des Betons vereinbart (Druckfestigkeitsklasse), sondern auch seine Dauerhaftigkeit in Bezug auf die vielfältigen Einflüsse seiner Umgebung (Expositionsklasse, Chloridgehaltsklasse) sowie die Verarbeitbarkeit (Größtkorn und Konsistenzklasse).

Der Kunde bestellt Eigenschaften, deren Erreichen das Betonwerk sicherstellen muss.

Grundlegende Anforderungen sind festzulegen:

- Bezug auf DIN EN 206-1 und DIN 1045-2
- Druckfestigkeitsklasse
- Expositionsklassen
- Größtkorn der Gesteinskörnung
- Unbewehrt, Stahlbeton, Spannbeton oder Klasse des Chloridgehalts
- Konsistenzklasse.

Zusätzliche Anforderungen dürfen festgelegt werden, z.B. Zement, besondere Anforderungen an die Gesteinskörnung, Luftporen, Frischbetontemperatur, Festigkeitsentwicklung, Wärmeentwicklung, verzögertes Ansteifen, Wassereindringwiderstand, Abriebwiderstand, Spaltzugfestigkeit und besondere technische Anforderungen.

Beton nach Zusammensetzung

Der Kunde bestellt eine bestimmte Betonzusammensetzung, das Betonwerk muss lediglich mit einem Chargenprotokoll sicherstellen, dass der Beton diesen Anforderungen entsprechend zusammengesetzt ist. Die Verantwortung für das Erreichen der Eigenschaften liegt hier beim Besteller.

Grundlegende Anforderungen sind festzulegen:

- Bezug auf DIN EN 206-1 und DIN 1045-2
- Zement: Art, Festigkeitsklasse, Gehalt
- Wasserzementwert oder Konsistenz
- Gesteinskörnung: Art, Größtkorn, Sieblinie
- Betonzusätze: Art, Menge, Herkunft.

Zusätzliche Anforderungen dürfen festgelegt werden, z.B. an die Herkunft aller Ausgangsstoffe, an die Gesteinskörnung, an die Frischbetontemperatur sowie weitere, besondere technische Anforderungen.

Abb. 2.2.3 Vorgaben für Standardbetone mit einem Zement der Festigkeitsklasse 32,5 und einem Größtkorn von 32 mm

	Mindestzementgehalt [kg/m³] für Konsistenzbezeichnung							
	steif	plastisch	weich					
C8/10	210	230	260					
C12/15	270	300	330					
C16/20	290	320	360					

Einteilung des Betons

Standardbeton

Standardbetone sind vereinheitlichte Betonzusammensetzungen zum Erreichen bestimmter Eigenschaften. Eine Erstprüfung muss nicht erfolgen. Der Einsatzbereich beschränkt sich auf Normalbetone der Druckfestigkeitsklassen bis C16/20 sowie auf die Expositionsklassen X0, XC1 und XC2.

Angaben zur Zusammensetzung eines Standardbetons sind der DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 zu entnehmen. In Abhängigkeit der angestrebten Konsistenz und Druckfestigkeitsklasse werden Mindestzementgehalte vorgeschriehen

Standardbetone basieren auf einem klassischen 3-Stoff-System. Neben Zement dürfen ausschließlich natürliche Gesteinskörnung und Wasser eingesetzt werden. Demnach sind Zusatzmittel sowie Zusatzstoffe von der Verwendung ausgeschlossen.

In der Praxis haben Standardbetone kaum eine Bedeutung. Es werden zum überwiegenden Anteil Betone nach Eigenschaften eingesetzt. Die Gründe sind naheliegend – moderne Produktionstechnik und eine ständige Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Transportbeton ermöglichen deutlich wirtschaftlichere Lösungen bei besserer Betonqualität. Zudem kann eine Reihe von vorteilhaften Eigenschaften erst durch den Einsatz von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen erreicht werden.

Expositionsklasse

Expositionsklassen beschreiben das Angriffsrisko von Umwelteinflüssen auf den Beton und die Bewehrung. Ausgehend davon werden entsprechende Mindestanforderungen an den Beton gestellt, z.B. in Form eines Mindestzementgehalts, der Begrenzung des maximalen Wasserzementwerts oder der Festlegung eines Luftgehalts im Beton, um die Dauerhaftigkeit der Betonkonstruktion zu gewährleisten.

Die unterschiedlichen Expositionsklassen mit ihren differenzierten Angriffsgraden sind in Abb. 2.2.5 dargestellt.

Für jedes Bauobjekt müssen sämtliche Expositionsklassen bauteilbezogen festgelegt werden. Nicht selten ergeben sich aus den Expositionsklassen-Anforderungen höhere Druckfestigkeitsklassen als aus statischen Gründen notwendig. Für die Betonherstellenden ist bei mehr als einer Expositionsklasse jeweils die mit den höchsten Anforderungen an den Beton für die Betonzusammensetzung maßgebend.

Die Expositionsklassen des Betons eines Bauteils

- sind die wichtigste Information in der Festlegung eines Betons
- bestimmen die Zusammensetzung des Betons (Wasserzementwert, Mindestzementgehalt, Zementart, LP-Gehalt, Gesteinskörnung etc.)
- bestimmen die Mindestdruckfestigkeitsklasse eines Betons
- bestimmen die Mindestbetondeckung des Bauteils
- bestimmen die bei der Ausführung geltende Überwachungsklasse.

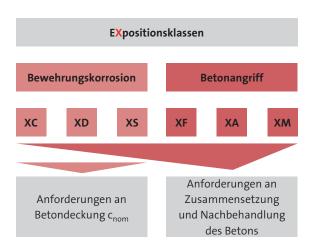


Abb. 2.2.4 Vereinfachte Übersicht über die Expositionsklassen

Einteilung des Betons

Abb. 2.2.5 Expositionsklassen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2



Nur für Beton ohne Bewehrung oder eingebettetes Material



Für massige Bauteile (kleinste Bauteilabmessung 80 cm) gilt der Mindestzementgehalt von 300 kg/m³



Gilt nicht für Leichtbeton



Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 63 mm darf der Zementgehalt um 30 kg/m³ reduziert werden. In diesem Fall darf b nicht angewendet werden



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



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



Zusatzstoffe des Typs II dürfen zugesetzt, aber nicht auf den Zementgehalt oder den w/z_{eq} angerechnet werden



Gesteinskörnungen bis D_{max} 4 mm müssen überwiegend aus Quarz oder Stoffen mindestens gleicher Härte bestehen, das gröbere Korn aus Gestein oder künstlichen Stoffen mit hohem Verschleiß-widerstand. Die Körner aller Gesteinskörnungen sollen eine mäßig raue Oberfläche und gedrungene Gestalt haben. Das Gesteinskorngemisch soll möglichst grobkörnig sein

		KI.	Umgebung	Anwendungsbeispiele
			forrosions- oder a	Bauteile ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall in nicht Beton angreifender Umgebung
		X0		unbewehrte Fundamente ohne Frost; unbewehrte Innenbauteile
			nrungskorrosion Karbonatisierung XC	Beton, der Bewehrung oder anderes Metall enthält und der Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist
		XC1	trocken oder ständig feucht	bewehrte Innenbauteile; Bauteile, die ständig in Wasser getaucht sind
		XC2	nass, selten trocken	Teile von Wasserbehältern; Gründungsbauteile
		XC3	mäßige Feuchte	vor Regen geschützter Beton im Freien; offene Hallen, Feuchträume
	gur	XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbauteile mit direkter Bewitterung; Beleuchtungsmasten, Balkone
-	Angriff auf Bewehrung		nrungskorrosion durch Chloride, nommen Meerwasser XD	Beton, der Bewehrung oder anderes Metall enthält und der chloridhaltigem Wasser einschließlich Taumittel, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist
	nt B(XD1	mäßige Feuchte	Bauteile im Sprühnebel von Verkehrsflächen; Einzelgaragen
٤	‡ aι	XD2	nass, selten trocken	Bauteile, die chloridhaltigen Industrieabwässern ausgesetzt sind; Solebäder
	ngu	XD3	wechselnd nass und trocken	Teile von Brücken mit Spritzwasserbeanspruchung; Fahrbahndecken, Parkdecks
•	⋖		nrungskorrosion durch Chloride eerwasser XS	Beton, der Bewehrung oder anderes Metall enthält und der Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Seeluft ausgesetzt ist
		XS1	salzhaltige Luft*	Außenbauteile in Küstennähe
		XS2	unter Wasser	Bauteile in Hafenanlagen, die ständig unter Wasser liegen
		XS3	Tidebereiche, Spritzwasser- und Sprühnebelbereiche	Kaimauern in Hafenanlagen
			ngriff mit und ohne kittel XF	Durchfeuchteter Beton, der erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist
		XF1	mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	Außenbauteile
		XF2	mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	Betonbauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich taumittelbehandelter Verkehrsflächen, soweit nicht XF4; Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser
		XF3	hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	Offene Wasserbehälter; Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser
	eton	XF4	hohe Wassersättigung, mit Taumittel	Mit Taumitteln behandelte Verkehrsflächen; überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich taumittelbehandelter Verkehrsflächen; Räumerlaufbahnen von Kläranlagen; Meerwasserbauteile in der Wechselzone
1 0	\mathbf{m}	Beton Angrif	korrosion durch chemischen ff XA	Beton, der chemischem Angriff durch natürliche Böden, Grundwasser, Meerwasser gemäß DIN EN 206-1, Tab. 2, und Abwasser ausgesetzt ist
	Angriff aut	XA1	chemisch schwach angreifend	entsprechend den Grenzwerten nach DIN EN 206-1, Tab. 2; Kläranlagen,
	Ang	XA2	chemisch mäßig angreifend	Güllebehälter, Bauteile im Kontakt mit Meerwasser oder in Beton angreifenden Böden, Industrieabwasseranlagen mit chemisch angreifendem Abwasser,
		XA3	chemisch stark angreifend	Gärfuttersilos und Futtertische der Landwirtschaft; Kühltürme mit Rauchgasableitung
			korrosion durch nleißbeanspruchung XM	Beton, der erheblichen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt ist
		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
		M	sehr starke Verschleißbeanspruchung	Tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch elasto- mer- oder stahlrollenbereifte Gabelstapler; häufig mit Kettenfahrzeugen befah- rene Oberflächen; Wasserbauwerke mit Geschiebebelastung, z.B. Tosbecken

Einteilung des Betons

, ;	Se G	D m 3	on don		*		
max. w/z bzw. w/z _{eq}	Mindestdruck- festigkeitsklasse	Mindestzement- gehalt in kg/m³	Mindestzement- gehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	CEM I Holcim-Pur	CEM II Holcim- Ferro	CEM III/A Holcim-Duo	CEM III/B Holcim- Aqua
_	C8/10	_	_	Х	X	Х	Х
0,75	C16/20	240	240	X	X	X	×
0,65	C20/25	260	240	X	Х	Х	Х
0,60	C25/30	280	270	Х	X	X	X
0,55	C30/37 e	300	270	Χ	Х	Х	X
 0,50	P C35/45 @	320 b	270	X	X	X	X
0,45	C35/45 e	320 b	270	Х	X	X	X
0,55	C30/37 e	300	270	X	X	X	X
0,50	C35/45 @	320 b	270	X	X	Х	X
0,45	C35/45 e	320 b	270	Х	Х	Х	Х
0,60	C25/30	280	270	Х	X	Х	X
0,55	C25/30 f	300	8	Х	X	x	X
0,50	C25/45 P	320	g	Χ	X	X	X
0,55	C25/30 f	300	270	X	Х	Х	Х
0,50	C35/45 P	320	270	X	X	Х	X
0,50	C30/37 1	320	g	X	X	X	x 0
0,60	C25/30	280	270	X	Х	Х	X
0,50	P C35/45 e	320	270	X	Х	Х	Х
0,45	C35/45 e	320	270	Х	Х	Х	Х
0,55	C30/37 e	300	270	X	X	X	X
0,55	C30/37 e	300	270	X	X	X	X
0,33	C35/45 @	320	270	X	X	X	X
0,45	C35/45 @	320	270	X	X	X	X



Höchstzementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfesten Betonen



Erdfeuchter Beton mit $w/z \le 0,40$ darf ohne Luftporen hergestellt werden



Gesteinskörnungen mit Regelanforderungen und zusätzlich Widerstand gegen Frost bzw. Frost- und Taumittel (DIN EN 12620 und DIN V 20 000-103)



Oberflächenbehandlung des Betons z.B. Vakuumieren und Flügelglätten des Betons



Hartstoffe nach DIN 1100



CEM III/B darf nur für die folgenden Anwendungsfälle verwendet werden (auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden):

a) Meerwasserbauteile: w/z ≤ 0,45; Mindestfestigkeitsklasse C35/45 und z ≥ 340 kg/m³ b) Räumerlaufbahnen w/z ≥ 0,35; Mindestfestigkeitsklasse C40/50 und $z \ge 360 \text{ kg/m}^3$; Beachtung von DIN 19 569-1, Kläranlagen Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen. Allgemeine Grundsätze



Schutzmaßnahmen erforderlich



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



Über die Zulassung bzw. Verwendung anderer Holcim Zemente beraten wir Sie gerne

Einteilung des Betons

Für die Herstellung von Beton nach DIN 1045-2 gibt es für einige Normzemente Anwendungsbeschränkungen für bestimmte Expositionsklassen (Abb. 2.2.6).

Abb. 2.2.6 Anwendungsbereiche für Zemente nach DIN 1045-2

Expositionsklassen × = gültiger		ns-/ ko				Be	wehrungskorrosion							
Anwendungsbereich = für die Herstellung nach dieser Norm nicht anwendbar,		rrosio Ffsrisil	dough Work and the comme				durch Cloride verursachte Korrosion							
		Kein Korrosions-/ Angriffsrisiko	durch Karbonatisierung verursachte Korrosion				andere Cloride als Meerwasser			Cloride aus Meerwasser				
sichtli	neine bai iche Zula: derlich		X0	XC1	XC2	ХСЗ	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	
CEM I			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
CEM II	A/B	S	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	Α	D	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	A/B	P/Q	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	A/B	٧	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	Α		×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
	В	W	×	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
	A/B	Т	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	Α		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	В	LL	×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Α		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	В	L	×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Α		×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
	В	M	×	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
CEM III	Α		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	В		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	С		×	0	×	0	0	0	×	0	0	×	0	
CEM IV	Α		×	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
	В		×	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
CEM V	Α		×	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	
	В		×	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	

Einteilung des Betons

	Betonangriff									keit
Frostangriff		Aggressive chemische Umgebung		Verschleiß		ß	Spannstahlverträglichkeit			
XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	ХМЗ	Spannst
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
×	0	×	0	×	×	×	×	×	×	0
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×
0	0	0	0	×	×	×	×	×	×	×
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
×	×	×	X 1)	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	× 2)	×	×	×	×	×	×	×
0	0	0	0	×	×	×	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

¹) Festigkeitsklasse ≥ 42,5 oder Festigkeitsklasse 32,5 R mit einem Hüttensand-Massenanteil von ≤ 50 %

²⁾ CEM III/B darf nur für die folgenden Anwendungsfälle verwendet werden:

a) Meerwasserbauteile: w/z \leq 0,45; Mindestfestigkeitsklasse C 35/45 und z \geq 340 kg/m 3

b) Räumerlaufbahnen w/z ≤ 0,35; Mindesfestigkeitsklasse C 50/50 und z ≥ 360 kg/m³; Beachtung von DIN 19 569-1 Auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden.

Einteilung des Betons

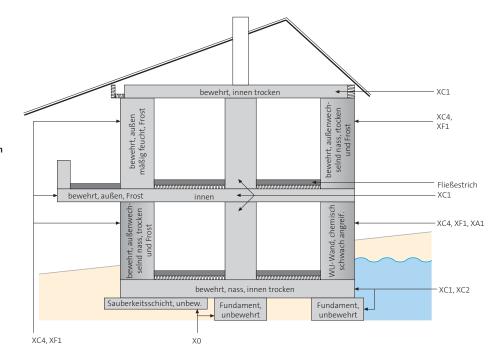
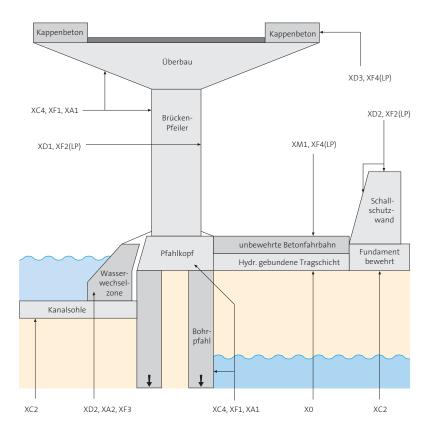


Abb. 2.2.7 Expositionsklassen am Beispiel einer Prinzipskizze für den Hochbau

Abb. 2.2.8 Expositionsklassen am Beispiel einer Prinzipskizze für den Ingenieurbau



Einteilung des Betons

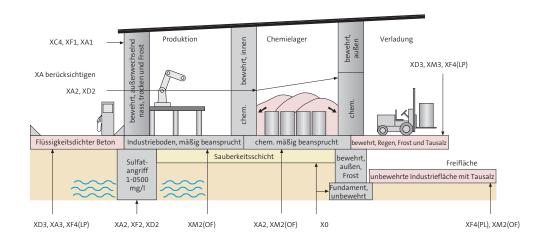


Abb. 2.2.9 Expositionsklassen am Beispiel einer Prinzipskizze für den Industriebau

Druckfestigkeitsklasse

Der Beton wird anhand seiner Druckfestigkeit in verschiedene Druckfestigkeitsklassen eingeteilt. Dabei wird zwischen den Druckfestigkeitsklassen für Normalund Schwerbeton und für konstruktiven Leichtbeton unterschieden. Um die unterschiedlichen Prüfmethoden innerhalb Europas zu berücksichtigen, werden je Druckfestigkeitsklasse die Mindestdruckfestigkeit sowohl für zylindrische als auch für würfelförmige Prüfkörper angegeben.

			kfestig-	Zylinder 1) 2)	Würfel ^{1) 3)}
	keitsklasse		sklasse	f _{ck,cyl} [MPa]	f _{ck,cube} [MPa]
				[/VIPa]	[MFa]
		С	8/10	8	10
		С	12/15	12	15
		С	16/20	16	20
		С	20/25	20	25
		С	25/30	25	30
ton		С	30/37	30	37
Normal- und Schwerbeton		С	35/45	35	45
Schw		С	40/50	40	50
pun		С	45/55	45	55
mal-		С	50/60	50	60
Nor		С	55/67	55	67
		С	60/75	60	75
	fest	С	70/85	70	85
	hochfest	С	80/95	80	95
		С	90/105 4)	90	105
		C 1	L00/115 ⁴⁾	100	115

¹⁾ Lagerung der Probe unter Wasser, Prüfalter 28 Tage

		ruckfestig- ceitsklasse	Zylinder ^{1) 2)} f _{ck,cyl} [MPa]	Würfel ^{1) 3)} f _{ck,cube} [MPa]
		LC 8/9	8	9
		LC 12/13	12	13
		LC 16/18	16	18
		LC 20/22	20	22
		LC 25/28	25	28
_		LC 30/33	30	33
oetor		LC 35/38	35	38
Leichtbeton		LC 40/44	40	44
۳		LC 45/50	45	50
		LC 50/55	50	55
		LC 55/60	55	60
	fest	LC 60/66	60	66
	hochfest	LC 70/77 ⁴⁾	70	77
		LC 80/88 ⁴⁾	80	88

¹⁾ Lagerung der Probe unter Wasser, Prüfalter 28 Tage

Abb. 2.2.10

Druckfestigkeitsklassen für Normalund Schwerbeton
(links,
≥ 2000 kg/m³)
sowie Leichtbeton
(rechts,
≤ 2000 kg/m³)
nach DIN EN 206-1
und DIN 1045-2.
Angegeben sind die
charakteristischen
Mindestdruckfestigkeiten

²⁾ Zylinder: Ø 150 mm, h = 300 mm

³⁾ Würfel: Kantenlänge = 150 mm

⁴⁾ Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall erforderlich

²⁾ Zylinder: \emptyset 150 mm, h = 300 mm

³⁾ Würfel: Kantenlänge = 150 mm

⁴⁾ Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall erforderlich

Einteilung des Betons

Chloridgehaltsklasse

Die Chloridgehaltsklasse gibt Auskunft über den höchstzulässigen Chloridgehalt aller Ausgangsstoffe des Betons. Er wird bezogen auf die Zementmasse angegeben und soll insbesondere bei bewehrten Bauteilen den Schutz der Bewehrung sicherstellen. Die Grenzwerte finden sich in Abb. 2.2.11. Im Allgemeinen kann von einem Einhalten der höchsten Anforderungsklasse, nämlich jener für Spannbeton, ausgegangen werden.

Abb. 2.2.11 Chloridgehaltsklassen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2

Betonverwendung	Chloridgehaltsklasse	Höchst zulässiger Chloridgehalt, bezogen auf den Zement [M%]
Unbewehrter Beton	Cl 1,0	1,0
Stahlbeton	CI 0,40	0,40
Spannbeton	CI 0,20	0,20

Konsistenzklasse

Für die Verarbeitung des Betons ist die Auswahl der geeigneten Konsistenz ebenfalls von Bedeutung. Abhängig von den in Deutschland üblichen Prüfmethoden der Konsistenzmessung (Ausbreitmaß, Verdichtungsmaß nach Walz) wurden den einzelnen Messbereichen nun entsprechende Konsistenzklassen (Abb. 2.2.12) zugeteilt.

Die Abstufung der Messbereiche ist dabei identisch zur bisherigen Praxis, es werden den Bereichen aber neue Klassenbezeichnungen zugeordnet.

Abb. 2.2.12 Konsistenzklassen nach DIN EN 206-1 und DIN 1054-2. In Deutschland angewandte Prüfmethoden und Konsistenzbeschreibung

Ausbreitmaß		Verdichtungsmaß		Setzmaß		Setzzeitklassen (Vébé)		Konsistenzbeschreibung
Klasse	Wert [mm]	Klasse	Wert	Klasse	Wert [mm]	Klasse	Setzzeit [s]	
		C0*	≥ 1,46					sehr steif
F1*	≤ 340	C1	1,45 bis 1,26	S1	10 bis 40	V0*	≥ 31	steif
F2	350 bis 410	C2	1,25 bis 1,11	S2	50 bis 90	V1	30 bis 21	plastisch
F3	420 bis 480	C3	1,10 bis 1,04	S3	100 bis 150	V2	20 bis 11	weich
F4	490 bis 550			S4	160 bis 210	V3	10 bis 6	sehr weich
F5	560 bis 620			S5*	≥ 220	V4*	5 bis 3	fließfähig
F6*	≥ 630							sehr fließfähig

^{*} Wegen fehlender Empfindlichkeit der Prüfverfahren nicht zu empfehlen.

Eine allgemein verbindliche Korrelation zwischen den Konsistenzklassen existiert nicht, jedoch hat die Praxis eine annähernde Gleichwertigkeit gezeigt.

Einteilung des Betons

Größtkorn

Zur vollständigen Beschreibung des Betons ist die Festlegung des Größtkorns erforderlich. In der Regel liegt es bei 32 mm. Für höhere Bewehrungsdichten oder kleinere Bauteile kann das Größtkorn auf 16 bzw. 8 mm begrenzt werden.

Die präzise Beschreibung des Betons soll gewährleisten, dass ein Beton mit einer Dauerhaftigkeit verwendet wird, die die Bauherrschaft im Zuge der Planung ihres Projekts erwartet (Kap. 2.1).

Die nachfolgenden Beispiele für Ausschreibungen (Abb. 2.2.14) sollen die erläuterten Einzelbestandteile zusammenführen.



Abb. 2.2.13 Lagerung der Prüfkörper im Wasserbad

Beton für Gebäudeinnenwand, Hochbau	Beton für Gebäudeaußenwand, Hochbau	Beton für vorgespannte Brückenbrüstung
Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2
C20/25	C25/30	C30/37
XC1	XC4; XF1	XC4; XD3; XF4
WO	WF	WA
D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 16
CI 0,20	Cl 0,20	CI 0,10
C3	F3	C2

Abb. 2.2.14
Beispiele für die
Ausschreibung
von Beton nach
Eigenschaften



Abb. 2.2.15 Messen des Würfels vor der Prüfung

Überwachungsklassen

Überwachungsklassen für Beton nach DIN 1045-3

Der Beton wird gemäß DIN 1045-3 in drei Überwachungsklassen eingeteilt. Wird Beton der Überwachungsklassen 2 und 3 eingebaut, muss die Überwachung durch das Bauunternehmen zusätzlich die Anforderungen von Anhang B (DIN 1045-3) erfüllen und eine Überwachung durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle nach Anhang C (DIN 1045-3) durchgeführt werden.

Abb. 2.3.1 Überwachungsklassen für Beton

Gegenstand	Überwachungsklasse 1	Überwachungsklasse 2	Überwachungsklasse 3
Druckfestigkeitsklasse für Normal- und Schwerbeton nach DIN EN 206-1 und			
DIN 1045-2	≤ C25/30 ¹⁾	≥ C30/37 und ≤ C50/60	≥ C55/67
Druckfestigkeitsklasse für Leichtbeton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 der Rohdichteklassen			
D1,0 - D1,4	nicht anwendbar	≤ LC25/28	≥ LC30/33
D1,6 - D2,0	nicht anwendbar	≤ LC35/38	≥ LC40/44
Expositionsklasse nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	X0, XC, XF1	XS, XD, XA, XM ²⁾ , ≥ XF2	
Besondere Betoneigenschaften nach DIN 1045-2		 Beton für wasserundurchlässige Bauteile (weiße Wannen) ³) Unterwasserbeton Beton für hohe Temperaturen (T ≤ 250°C) Strahlenschutzbeton (außerhalb des Kernkraftwerkbaus) Für besondere Anwendungsfälle (z.B. verzögerter Beton, Fließbeton, Beton im Umgang mit wassergefährdeten Stoffen) sind die jeweiligen DAfStbRichtlinien anzuwenden. 	

¹⁾ Spannbeton der Festigkeitsklasse C25/30 ist stets in Überwachungsklasse 2 einzuordnen.

²⁾ Gilt nicht für übliche Industrieböden.

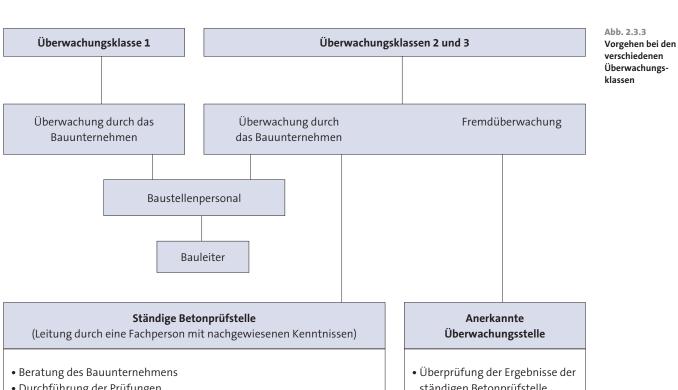
³⁾ Beton mit hohem Wassereindringwiderstand darf in die Überwachungsklasse 1 eingeordnet werden, wenn der Baukörper nur zeitweilig aufstauendem Sickerwasser ausgesetzt ist und wenn in der Projektbeschreibung nichts anderes festgelegt ist.

Überwachungsklassen

Prüfgegenstand	Überwachungsklasse 1	Überwachungsklasse 2	Überwachungsklasse 3
Konsistenz	In Zweifelsfällen	Beim ersten Einbringen jedBei Herstellung von ProbekIn Zweifelsfällen	ler Betonzusammensetzung örpern für Festigkeitsprüfung
Luftgehalt des Frischbetons bei LP-Zusatz	-	 Zu Beginn jedes Betonierab In Zweifelsfällen	oschnitts
Druckfestigkeit an in Formen hergestellten Probekörpern	In Zweifelsfällen	 3 Probekörper Je 300 m³ oder Je 3 Betoniertage 	3 Probekörper • Je 50 m³ oder • Je Betoniertag

Abb. 2.3.2 Mindesthäufigkeit der Prüfungen

Die Forderung, die die größte Anzahl von Probekörpern ergibt, ist maßgebend.



- Durchführung der Prüfungen
- Überprüfung der Geräteausstattung vor dem Betonieren, laufende Überprüfung und Beratung bei Verarbeitung und Nachbehandlung. Ergebnisse sind aufzuzeichnen
- Beurteilung und Auswertung der Ergebnisse
- Schulung des Fachpersonals
- Längerfristiger Vertrag, mindestens ein Jahr
- Gleichzeitige Überwachung eines Zulieferers unzulässig

- ständigen Betonprüfstelle
- Überprüfung der Baustelle
- Evtl. zusätzliche Prüfungen
- Aufzeichnung, Überwachungsbericht

Verarbeitbarkeit und Konsistenz

Bedeutung der Verarbeitbarkeit

Von der Verarbeitbarkeit des Betons hängt es wesentlich ab, wie gut und wie leicht und mit welchen Kosten er sich auf der Baustelle umschlagen, fördern und in die Schalung einbringen und verdichten lässt. Vom sachgerechten Einbringen, der einwandfreien Umhüllung der Bewehrung mit Beton und von einer guten Verdichtung hängen entscheidend die Qualität des erhärteten Betons, seine Festigkeit und vor allem seine Dauerhaftigkeit ab.

Definitionen von Verarbeitbarkeit und Konsistenz

Der Begriff Betonverarbeitbarkeit lässt sich nicht präzise definieren. Man versteht darunter ein Bündel von verschiedenen Eigenschaften, wie Konsistenz, Kohäsion (Zusammenhalt) bzw. Entmischungsneigung, Fließverhalten und Abziehbarkeit (Finishverhalten), die alle voneinander abhängen. Die Konsistenz lässt sich mit verschiedenen Prüfmethoden praxisgerecht charakterisieren.

Konsistenz-Prüfmethoden: «Walz», Ausbreitmaß, Setzmaß

Die in Deutschland am meisten verwendeten Konsistenz-Prüfmethoden sind das Verdichtungsmaß nach Walz, das Ausbreitmaß, sowie das Setzmaß (im englischen Sprachgebiet Slump genannt).

Die genannten Prüfmethoden (Abb. 2.4.1, 2.4.2, 2.4.3) sind nicht im gesamten Konsistenzbereich gleichermaßen geeignet.

Aus Abb. 2.2.12 sind die gebräuchlichen Bezeichnungen für die verschiedenen Konsistenzbereiche, die hierfür geeigneten Prüfmethoden sowie die für den betreffenden Bereich charakteristischen Messwerte ersichtlich.

Die Verarbeitbarkeit bei Betonierbeginn überprüfen

Gleiche Konsistenzmesswerte von Beton aus verschiedenen Werken bürgen nicht unbedingt für gleiche Verarbeitbarkeit, da das Messergebnis von der Art der Betonrohstoffe wie auch der Herstellung etwas beeinflusst wird. Es ist deshalb angezeigt, bei Beginn des Betonierens die Verarbeitbarkeit praktisch zu überprüfen und, falls notwendig, die Konsistenz zu korrigieren. Insbesondere muss beim Wechsel der Betonausgangsstoffe die für das gegebene Bauteil geeignete Konsistenz mit einer Erstprüfung neu festgelegt werden.

Abb. 2.4.1 Verdichtungsmaß nach Walz







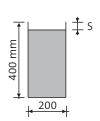


Abb. 2.4.2 Ausbreitmaß







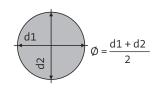
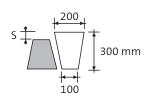


Abb. 2.4.3 Setzmaß (Slump)









Verarbeitbarkeit und Konsistenz

Veränderung der Konsistenz mit Hilfe von Zusatzmitteln

Über den Einsatz von Fließmittel ist es möglich, Beton mit einem w/z-Wert von 0,5 und weniger herzustellen, der gleichwohl eine plastische bis sehr fließfähige Konsistenz hat (siehe auch Kap. 1.4).

Steuergrößen für die Konsistenz und Betonfestigkeit

Neben Zusatzmitteln beeinflussen noch eine Menge anderer Faktoren die Betonkonsistenz. Eine Veränderung eines oder mehrerer Faktoren wirkt sich nicht nur auf die Konsistenz, sondern auch auf die Festigkeit (und auf andere Eigenschaften) des Betons aus, oft jedoch nicht in der gleichen Richtung. Abb. 2.4.4 zeigt, wie sich verschiedene betontechnologische Maßnahmen auf Konsistenz und Betondruckfestigkeit auswirken.

Änderung	Konsistenz	Druckfestigkeit nach 28 Tagen
Stetigere Kornverteilung	7	→
Mehr Rundkorn	7	→
Mehr gebrochenes (kantiges) Korn	~	7
Mehr Zugabewasser	7	`
Höhere Betontemperatur	×	\
Einsatz von Verflüssigern (BV, FM)	7	≯
Einsatz von Luftporenbildnern (LP)	7	`
Einsatz von Verzögerern (VZ)	7	→
Zusatzstoffe Typ II	7	7

Abb. 2.4.4 Wirkung verschiedener Maßnahmen auf Konsistenz und Festigkeit

Die Verarbeitbarkeit nimmt nach dem Mischen ab

Es ist unvermeidlich, dass der Beton nach dem Mischende langsam anzusteifen beginnt und sich die Verarbeitbarkeit dadurch verschlechtert (Abb. 2.4.5). In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die angegebene Konsistenz sich in der Regel auf den Zeitpunkt unmittelbar nach dem Ende des Mischens oder auf den Zeitpunkt der Ankunft bzw. Übergabe des Betons auf der Baustelle bezieht. Das Ansteifen erfolgt bei hoher Betontemperatur sowie bei rasch erhärtenden Zementen schneller.

Mit der Verwendung langsamer erhärtender Zemente, beispielsweise den Hochofenzementen Holcim-Duo und Holcim-Aqua lässt sich diesem Effekt entgegenwirken ebenso mit geeigneten Zusatzmitteln.

Die Verarbeitbarkeit des Betons darf nie durch nachträglichen Wasserzusatz verbessert werden.

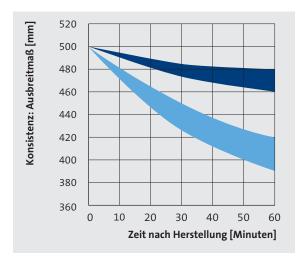


Abb. 2.4.5
Einfluss der Zeit
auf die Konsistenz
nach dem Anmachen des Betons.
Der dunkle Bereich
gilt für Fließmittel
auf PCE-Basis, der
helle für herkömmliche Fließmittel

Herstellung und Transport

Dosieren und Mischen der Ausgangsstoffe

Die Herstellung des Betons steht in engem Zusammenhang mit der eingesetzten Maschinentechnik.
Die Dosierung hat die Aufgabe, die Ausgangsstoffe der Betonmischung wie Zement, Zugabewasser, Gesteinskörnung, Zusatzmittel und Zusatzstoffe in bestimmten Mengen zu dosieren, sodass ein definiertes Mischungsverhältnis mit großer Genauigkeit erzielt wird. Zwei Systeme werden eingesetzt, die volumetrische und/oder die massenmäßige Dosierung, wobei letztere genauere Resultate ergibt.

Dosiergenauigkeit

Die Komponenten des Betons sind mit einer Genauigkeit von ± 3 Prozent beizugeben.

Die Reihenfolge der Zudosierung ist für jede Mischanlage durch systematische Vorversuche zu bestimmen. Sie ist zusammen mit dem Mischer entscheidend für:

- den Aufschluss (Dispergierung) des Zements und der Zusatzstoffe
- den Mischeffekt
- die Mischintensität
- die optimale Wirkung der Zusatzmittel
- die optimale Umhüllung der Gesteinskörnung mit dem Feinstmörtel (Zementleim)
- die Anlagenleistung
- die Mischdauer
- den Verschleiß.

Bei Transportbetonwerken wird üblicherweise ein Zwangsmischer eingesetzt, der diskontinuierlich mit Einzelchargen arbeitet. Jeder Mischertyp verlangt eine minimale Chargengröße. Ein Unterschreiten dieser Chargengröße wirkt sich negativ auf die Frischbetonqualität aus.

Mischdauer

Die Mischdauer ist von der Mischerleistung abhängig. Sie ist durch Versuche festzulegen.

Definition

Die Mischdauer = «Nassmischdauer» beginnt, wenn alle Ausgangsstoffe im Mischer sind.
Gemäß DIN EN 206-1, Art. 9.8, und DIN 1045-2 muss das Mischen der Ausgangsstoffe so lange dauern, bis die Mischung gleichförmig erscheint (mindestens 30 Sekunden).

Wird während des Mischvorganges eine Feinnachdosierung des Zugabewassers zum Erreichen der vorgegebenen Frischbetonkonsistenz notwendig, ist die Mischdauer angemessen zu verlängern.

Abb. 2.5.1 Empfohlene Mischdauer

Empfohlene Mischdauer für die Nassmischzeit im Transportbetonwerk	Dauer [s]
Normalbeton	60
Beton mit besonderen Eigenschaften (z.B. Luftporenbeton)	90
Beton mit Silicastaub (Slurry/Granulat)	≥ 120
Selbstverdichtender Beton (Kap. 2.9)	≥ 120

Empfohlene Mischdauer bei Zugabe von Zusatzmitteln im Fahrmischer	Dauer
Normalbeton	≥ 1 Minute je m³,
	mindestens aber
	5 Minuten je Fahrmischer

Herstellung und Transport

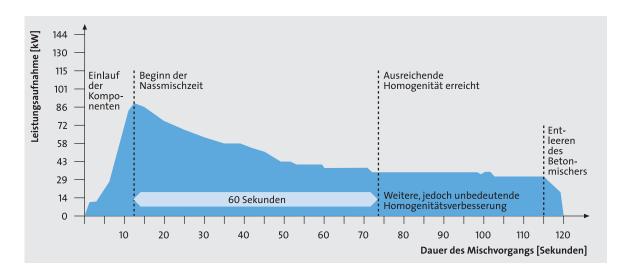


Abb. 2.5.2 Typischer Verlauf der Leistungsaufnahme des Mischermotors während des Mischvorgangs für Rüttelbeton

Versuche und die Praxis haben gezeigt, dass noch andere Faktoren als die Homogenität für die Qualität des Betons eine wesentliche Rolle spielen. Die in das Mischgut eingebrachte Energie aktiviert den Zement und übt einen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung des Betons aus (Abb. 2.5.3).

Anlagentechnik

Heutige Transportbetonanlagen verfügen in der Regel über rechnergestützte Misch- und Dosiereinrichtungen. Die Mischungszusammensetzungen sind im Steuerungsrechner hinterlegt und können durch Eingabe der Sortennummer abgerufen werden.

Der Steuerungsrechner regelt dabei qualitätsrelevante Prozesse. So wird z.B. die Menge der einzuwiegenden oberflächenfeuchten Gesteinskörnung automatisch bestimmt und das Zugabewasser angepasst.

Der Anlagenführer überwacht den Herstellungsprozess am Bildschirm.

In Abb. 2.5.2 ist ein typischer Verlauf der Leistungsaufnahme des Mischermotors dargestellt. Diese sog.
Misch- oder Konsistenzkurve kann zur Beurteilung der
Frischbetonkonsistenz bei der Herstellung verwendet
werden. Weiterhin verfügen Transportbetonanlagen oft
über eine Mischerkamera. Damit kann der Anlagenführer
den gerade produzierten Frischbeton visuell beurteilen. Eine solche Anlagentechnik gewährleistet höchste
Qualität bei maximaler Produktionsleistung. Wegen der
vielfältigen Anforderungen an die Frisch- und Festbetoneigenschaften kann heute auf moderne Anlagentechnik
kaum noch verzichtet werden.



Abb. 2.5.3 Moderne Transportbetonanlage



Abb. 2.5.4 Blick in einen Doppelwellen-

Herstellung und Transport

Betontransport

Transportbeton ist nach seiner Herstellung im Betonwerk möglichst rasch auf die Baustelle zu transportieren und zu verarbeiten. Dadurch lassen sich Qualitätseinbußen vermeiden. Das Ansteifen des Frischbetons wird so gering wie möglich gehalten, um eine optimale Verarbeitbarkeit sicherzustellen. Wird der Beton nach dem Erstarrungsbeginn eingebaut, kann sich dies negativ auf die Festbetoneigenschaften auswirken.

Auf der Baustelle muss jeder Lieferschein vom Baustellenverantwortlichen überprüft werden. Weitergehende Prüfungen sind je nach Art des Betons, oder entsprechend seiner Eigenschaften erforderlich. Die Angaben der DIN EN 206-1 / DIN 1045-3 sind zu beachten. Bei Fahrmischertransporten soll der Beton nach der Ankunft auf der Baustelle unmittelbar vor dem Entladen 1 bis 2 Minuten nachgemischt werden. Besonders wichtig ist dies bei Luftporenbeton. Eine nachträgliche Wasserbeigabe ist zu unterlassen. Wird vom Baustellenverantwortlichen eine

Zugabe von Zusatzmitteln veranlasst, gelten die Mindestmischzeiten nach Abb. 2.5.1. Jede Veränderung des Betons muss auf dem Lieferschein vermerkt werden. Bei Fahrzeugen ohne Nachmischmöglichkeit ist jede Veränderung des Betons zu unterlassen.

Kann der Beton auf der Baustelle nicht sofort entladen werden, sind vor dem Einbringen in jedem Fall die Eigenschaften des Betons (Konsistenz, Luftgehalt usw.) darauf zu überprüfen, ob sie den getroffenen Vereinbarungen und Anforderungen noch entsprechen. Der Frischbeton sollte spätestens nach 90 Minuten (bei steifer Konsistenz und dem Transport ohne Fahrmischer nach 45 Minuten) vollständig entladen sein.



Abb. 2.5.5 Fahrmischer

Des weiteren birgt der Transport die Gefahr des Entmischens. Diese Gefahr erhöht sich bei weicheren Frischbetonkonsistenzen. Daher werden zum Frischbetontransport in der Regel Fahrmischer eingesetzt. Diese halten den Beton während des Transportes durch Drehen der Trommel in Bewegung und verhindern so eine Entmischung. Gleichzeitig schützt die geschlossene Bauweise des Fahrmischers den Frischbeton vor Witterungseinflüssen wie z.B. Regen, Sonne oder Wind. Bei einem Transport ohne Fahrmischer sind geeignete Maßnahmen zum Schutz des Betons zu ergreifen. Dies kann durch Abdecken des Betons mit einer Plane geschehen.

Einbringen und Verdichten

Fördermittel	Betonkonsistenz						
	C1	C2/F2	C3/F3	F4			
Förderband							
Kübel							
Betonpumpe							
Kübel mit Fallrohr							
Rinne oder Rutsche							

Abb. 2.6.1 Fördermittel in Abhängigkeit von der Konsistenz

Fördern und Einbringen

Je nach Konsistenz und/oder örtlichen Gegebenheiten werden die in Abb. 2.6.1 genannten Fördermittel eingesetzt.

Die Anlieferungsmenge und die Einbauleistung müssen aufeinander abgestimmt sein. Das Einbringen des Betons soll mit gleichbleibender Geschwindigkeit in möglichst gleichmäßig dicken, horizontalen Schichten erfolgen.

Um das Entmischen zu vermeiden, soll die Schütthöhe höchstens 50 cm betragen. Bei Fallhöhen von über 2 m sollte der Beton durch ein Fallrohr oder einen Verteilschlauch eingebracht werden.

Verdichten

Gutes Verdichten ist die Voraussetzung für einen dauerhaften Beton.

Die Vorteile eines gut verdichteten Betons sind:

- erhöhte Dichtigkeit
- verbesserte Dauerhaftigkeit
- gute Druckfestigkeit
- bessere Haftung zwischen Bewehrung und Beton.

Verdichtungsarten

Die Wahl der Verdichtungsart ist abhängig von der Konsistenz. Bei Verwendung gebräuchlicher Konsistenzen C3/F3 und C2/F2 wird in der Regel durch Rütteln verdichtet. Nur bei sehr niedrigen Konsistenzen C1 wird gestampft.

Das Rütteln erfolgt am häufigsten mit Innenrüttlern oder mit Außenrüttlern (Schalungsvibratoren, Oberflächenfertiger mit Flächenvibratoren). Häufig werden die Methoden auch kombiniert eingesetzt.

Beim Rütteln werden Schwingungen erzeugt, die die innere Reibung zwischen den Gesteinskörnern fast vollständig überwinden. Die Einzelkörner lagern sich dichter aneinander, die eingeschlossene Luft entweicht in Form von Luftblasen an die Oberfläche (natürlicher Luftgehalt nach der Verdichtung noch 1 bis 2 Volumenprozent), die Hohlräume füllen sich mit Feinstmörtel, und der Frischbeton verdichtet sich unter der Einwirkung der Schwerkraft.

Bei selbstverdichtendem Beton muss auf den Einsatz von Rüttlern verzichtet werden, da sonst die Gefahr der Entmischung besteht (Kap. 2.12).



Abb. 2.6.2 Einbringen mit der Pumpe und verdichten mit der Rüttelflasche

Einbringen und Verdichten

Wirkungsbereich elektrischer Hochfrequenz-Innenrüttler (Abb. 2.6.3)

Erfahrungsgemäß hat sich die Frequenz von 12 000 Umdrehungen pro Minute für üblichen Beton als am günstigsten erwiesen.

Für feinkörnige Betone ist die Frequenz des Rüttlers zu erhöhen (bis 18000 U/Min.).

Abb. 2.6.3 Anhaltswerte für den Durchmesser des Wirkungsbereichs und den Abstand der Eintauchstellen

Durchmesser Innenrüttler [mm]	Durchmesser des Wirkungs- bereichs [cm]	Abstand zwischen den Eintauchstellen [cm]
< 40	30	25
40 bis 60	50	40
> 60	80	70

Doerfläche der unverdichteten Schüttung bereits verdichtete Schicht Innenrüttler

Abb. 2.6.4 Frischbetoneinbau und Verdichtung



Regeln für gutes Verdichten

- Der Innenrüttler ist rasch in möglichst gleichen Abständen in den Beton einzuführen und nach kurzem Verharren im Tiefstpunkt langsam herauszuziehen, wobei sich die Oberfläche des Betons schließen muss. Schließt sich die Oberfläche nicht mehr, ist die Konsistenz zu steif, das Erstarren des Betons hat bereits begonnen, oder die Rütteldauer war nicht ausreichend.
- Der Beton soll nicht mit dem Innenrüttler verteilt werden
- Das Rütteln ist zu beenden, sobald sich an der Oberfläche eine dünne Feinmörtelschicht gebildet hat und größere Luftblasen nur noch vereinzelt austreten.
- Der Abstand der Eintauchstellen ist so zu wählen, dass sich die von der Rüttelbewegung erfassten Betonbereiche überschneiden.
- Wird Beton in mehreren Schichten «frisch in frisch» eingebracht, muss der Innenrüttler durch die zu verdichtende Schicht hindurch noch etwa 10 bis 15 cm tief in den sich darunter befindenden Beton eintauchen, damit eine Verbindung der beiden Schichten gewährleistet ist (Abb. 2.6.4).

Faustregel

Abstand der Eintauchstellen = 8- bis 10-facher Durchmesser des Innenrüttlers

Nachverdichten

Durch das Nachverdichten des bereits verdichteten, aber noch nicht erstarrten Betons kann dessen Dichtigkeit nochmals erhöht werden. Dies gilt vor allem für Beton mit hohem w/z-Wert und geringem Wasserrückhaltevermögen, für besonders massige Bauteile sowie für Beton, der mit hoher Förderleistung eingebracht wurde. Hohlräume, die sich durch ein Nachsacken des Frischbetons unter waagerechten Bewehrungsstäben gebildet haben, können geschlossen werden. Voraussetzung für das Nachverdichten ist, dass es zum richtigen Zeitpunkt geschieht und der Beton noch verformbar ist. Dies ist allerdings schwierig zu bestimmen. Das Nachverdichten darf nur durch erfahrenes Fachpersonal ausgeführt werden.

Nachbehandlung

Zweck und Ziele

Die Nachbehandlung hat den Zweck, den jungen Beton vor Wasserverlust und schädlichen Einwirkungen zu schützen. Druckfestigkeit allein garantiert keine Dauerhaftigkeit, der Beton muss auch dicht sein. Gerade im oberflächennahen Bereich ist ein Zementstein mit hoher Dichtigkeit und einer möglichst geringen Porosität sehr wichtig für einen erhöhten Widerstand gegen Karbonatisierung und das Eindringen schädigender Stoffe.

Unter Nachbehandlung versteht man alle Maßnahmen, die dazu geeignet sind, den frisch verarbeiteten und jungen Beton bis zum Erreichen einer ausreichenden Festigkeit zu schützen.

Die wichtigsten Ziele der Nachbehandlung sind der Schutz vor:

- vorzeitigem Austrocknen durch Wind, Sonne, trockene Kälte
- extremen Temperaturen (Kälte/Hitze) und raschen Temperaturwechseln
- Niederschlägen
- vorzeitigen Einwirkungen von Fremdstoffen (Öl usw.).

Abb. 2.7.2 Ummantelung einer Betonstütze mit Thermomatte



Vorzeitiges Austrocknen

Besonders wichtig ist der Schutz gegen vorzeitiges Austrocknen, mit dem unmittelbar nach dem Einbringen zu beginnen ist. Folgen des zu frühen Wasserverlusts im oberflächennahen Bereich sind:

- starke Frühschwindrissneigung (Kap. 3.2 «Rissbildung»)
- geringe Festigkeit
- Neigung zum Absanden
- geringere Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit
- verminderter Verschleißwiderstand.



Abb. 2.7.1 Abdecken einer Betondecke mit Plastikfolie

Schutzmaßnahmen gegen vorzeitiges Austrocknen

- in der Schalung belassen
- mit Folien abdecken (Abb. 2.7.1)
- mit Thermomatten abdecken (Abb. 2.7.2)
- wasserhaltende Abdeckungen aufbringen (Jute, Geotextilmatten)
- flüssige Nachbehandlungsmittel aufbringen (Curing compound, Abb. 2.7.3)
- kontinuierliches Besprühen mit Wasser
- Unterwasserlagerung
- Kombination der aufgeführten Maßnahmen.



Abb. 2.7.3 Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels

Nachbehandlung

Austrocknungsgeschwindigkeit

Die Austrocknungsgeschwindigkeit hängt ab von der:

- Lufttemperatur
- Betontemperatur
- relativen Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit.

Typische Auswirkungen dieser Faktoren sind in Abb. 2.7.4 und Abb. 2.7.5 dargestellt.

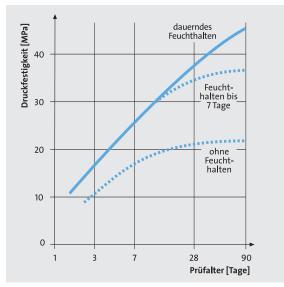


Abb. 2.7.4 Einfluss des Feuchthaltens auf die Festigkeitsentwicklung des Betons im Oberflächenbereich

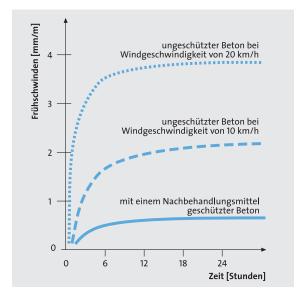


Abb. 2.7.5
Frühschwinden als Folge mangelhafter Nachbehandlung bei extremen Witterungsbedingungen

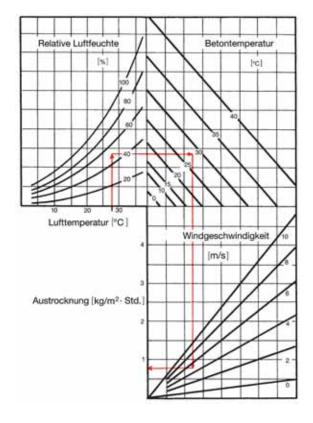


Abb. 2.7.6 zeigt Zusammenhänge zwischen den genannten Größen auf und kann zum Abschätzen der Austrocknungsrate verwendet werden.

Abb. 2.7.6

Diagramm zum Abschätzen der Austrocknungsrate an offen liegenden Betonflächen.

Eingezeichnetes Beispiel: Lufttemperatur: 28°C, relative Luftfeuchte: 50 %, Betontemperatur: 28°C, Windgeschwindigkeit: 5 m/s. Ergebnis: Austrocknungsrate = 0,8 kg/m² · Std.

Nachbehandlung

Extreme Temperaturunterschiede

Bei Wärme dehnt sich der Beton aus, bei Kälte zieht er sich zusammen. Dies führt zu Spannungen, wenn der Beton bei der Verformung behindert wird oder wenn sich extreme Temperaturunterschiede innerhalb des Betonkörpers einstellen können. Deshalb ist zu verhindern, dass zwischen der Betonoberfläche und dem Betonkern größere Temperaturunterschiede als 15°C entstehen und der noch nicht ausreichend erhärtete Beton schroffen Temperaturwechseln ausgesetzt wird. Überschreiten die Spannungen die noch geringe Zugfestigkeit des jungen Betons, führt dies zu Rissen.

Maßnahmen zur Verminderung der Temperaturunterschiede sind in Abb. 2.7.7 aufgeführt. Weitere Maßnahmen zum Vermeiden oder Verringern von Temperaturunterschieden oder deren Auswirkungen finden sich in Kapitel 3.2 «Rissbildung».

Nachbehandlungsmaßnahmen

Die Art (Abb. 2.7.7) und die Dauer der Nachbehandlung richten sich vorwiegend nach den herrschenden Witterungsbedingungen und den zu schützenden Bauteilen. DIN 1045-3 macht Angaben zur Mindestdauer der Nachbehandlung (Abb. 2.7.8).

Nachbehandlungs- und Ausschalfristen sind um die Anzahl der effektiven Frosttage zu verlängern.

Hinweis

Wird zur Nachbehandlung ein Nachbehandlungsmittel (Curing) aufgesprüht, sollte darauf geachtet werden, ob der Beton nachträglich beschichtet werden soll.

Ist das Curing wachshaltig, muss bei nachträglicher Betonbeschichtung der Untergrund vorbehandelt werden (z.B. Sandstrahlen, Wasserhochdruck, Kugelstrahlen). Wachshaltige Curing-Mittel dürfen nicht in die Betonoberfläche eingeglättet werden. Es gibt neuerdings wachsfreie Curings, die als Glätthilfen dienen. Zum einen lässt sich der Beton leichter glätten, zum anderen kann man das Curing trotz nachträglicher Beschichtung in die Betonoberfläche mit einglätten.

Maßnahmen	Außentemperaturen in °C				
	unter	−3 bis	5 bis	10 bis	über
	-3	+5	10	25	25
Holzschalung nässen; Stahlschalung vor Sonneneinstrahlung schützen. Abdecken oder Aufsprühen von Nachbehandlungsmittel oder Feuchthalten durch kontinuierliches Benetzen				•	•
Abdecken oder Aufsprühen von Nachbehandlungsmittel			•	•	
Vorwärmen der Schalung und Bewehrung. Abdecken oder Aufsprühen von Nachbehandlungsmittel; Auflegen von Thermomatten		•			
Vorwärmen der Schalung und Bewehrung. Abdecken mit Thermomatten. Betontemperatur mindestens 3 Tage lang auf + 10 °C halten (Bauteil umschließen und beheizen)	•				

Abb. 2.7.7 Nachbehandlungsmaßnahmen bei verschiedenen Außentemperaturen

Nachbehandlung

Abb. 2.7.8 Mindestdauer der Nachbehandlung nach DIN 1045-3

Expositions- klasse	Erforderliche Festigkeit im oberflächennahen Bereich	Mindestdauer der Nachbehandlung
X0, XC1	-	0,5 Tage (mindestens 12 Stunden)
Alle Klassen, außer X0, XC1, XM	0,5 · f _{ck}	Werte der Tabelle unten
XM	0,7 · f _{ck}	Werte der Tabelle unten verdoppeln

In Abb. 2.7.8 ist die Mindestdauer der Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons für alle Expositionsklassen nach DIN 1045-2 dargestellt. Entsprechend dem Entwurf der A2-Änderung zur DIN 1045-3 (Mai 2007) können für die Expositionsklassen XC2, XC3, XC4 und XF1 die erforderlichen Nachbehandlungsdauern auch über die Frischbetontemperatur zum Zeitpunkt des Betoneinbaus festgelegt werden, wenn ein übermäßiges Auskühlen des Betons im Anfangsstadium ausgeschlossen wird.

Oberflächen- temperatur	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen			
T [°C] ²⁾	Festigkeitsentwicklung des Betons: $r = f_{cm2}/f_{cm28}^{-1}$			
	r ≥ 0,50 schnell	•	r ≥ 0,15 langsam	r < 0,15 sehr langsam
≥ 25	1	2	2	3
25 > T ≥ 15	1	2	4	5
15 > T ≥ 10	2	4	7	10
10 > T ≥ 5	3	6	10	15

¹⁾ f_{cm2} bzw. f_{cm28} bezeichnen die Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 bzw. 28 Tagen.

²⁾ Anstelle der Oberflächentemperatur des Betons darf die Lufttemperatur angesetzt werden.

Expositions klassen XC2, XC3, XC4 und XF1	Mindestdauer der Nachbehandlu in Tagen Festigkeitsentwicklung des Betor			
Frischbeton- temperatur T [°C] ¹⁾	r ≥ 0,50 schnell	r = τ _{cm} r ≥ 0,30 mittel	₂ /f _{cm28} ¹⁾ r ≥ 0,15 langsam	r < 0,15 sehr langsam
≥ 15	1	2	4	k.A.
15 > T ≥ 10	2	4	7	k.A.
10 > T ≥ 5	4	8	14	k.A.

¹⁾ Kann ein übermäßiges Auskühlen des Betons im Anfangsstadium ausgeschlossen werden, können für die Expositionsklassen XC2, XC3, XC4 und XF1 die erforderlichen Nachbehandlungsdauern auch über die Frischbetontemperatur zum Zeitpunkt des Betoneinbaus festgelegt werden.

Abb. 2.7.9 Einhausungen bieten einen hohen Schutz vor unerwünschten Witterungseinflüssen

Niederschläge

Niederschläge können häufig bleibende Schäden (hohe Porosität, verminderte Dauerhaftigkeit, Auswaschungen) am frischen oder jungen Beton verursachen. Deshalb ist vor dem Betonieren die vorbereitete Schalung von stehendem Wasser zu befreien. Der frisch eingebrachte Beton ist vor Regen zu schützen, gegebenenfalls mit Folien oder durch Einhausung (Abb. 2.7.9).





Betonieren bei warmer Witterung

Im Sommerhalbjahr stellt man oft einen Abfall der durchschnittlichen 28-Tage-Betondruckfestigkeit von einigen MPa fest. Man spricht vom so genannten Sommerloch (Abb. 2.8.1).

Es handelt sich dabei um eine aus allen Ländern mit ausgeprägten saisonalen Temperaturunterschieden bekannte Erscheinung. Sie ist vornehmlich auf zwei Ursachen zurückzuführen.

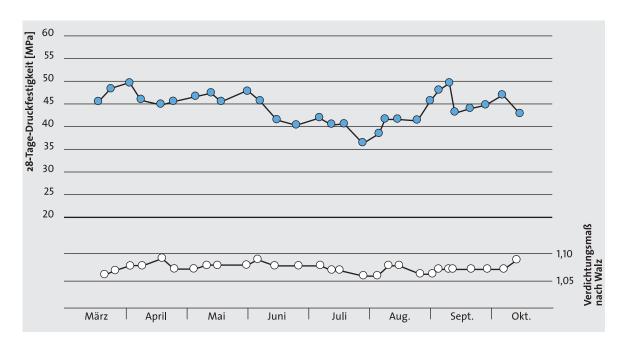


Abb. 2.8.1
Typische Betonfestigkeits- und
Verarbeitbarkeitsstatistik während
des Sommerhalbjahrs. Daten aus
der Qualitätssicherung eines
Transportbetonwerks

Höhere Betontemperatur

Die im Allgemeinen höhere Betontemperatur bewirkt eine schnellere Zementhydratation. Diese führt zu einer höheren Frühfestigkeit, weil sich gegenüber niedrigeren Temperaturen rascher Zementhydratkristalle bilden, die allerdings kleiner sind. Kleinere Kristalle können sich weniger intensiv verfilzen als größere. Es stellt sich auch eine höhere Porosität ein. Da der Grad der Kristallverfilzung und die Porosität die Endfestigkeit des Betons erheblich beeinflussen, nimmt diese ab (Abb. 2.8.2).

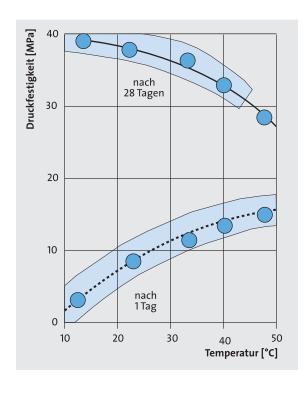


Abb. 2.8.2 Auswirkung der Temperatur auf die Entwicklung der Druckfestigkeit von Beton

Betonieren bei warmer Witterung

Unzulässige Wasserzugabe

Bei hohen Temperaturen nimmt das Ansteifen des Betons zu. Auch eine höhere Ausgangskonsistenz bei Transportbeton durch höhere Fließmittelgehalte kann dieses Verhalten nicht ganz kompensieren. Deshalb ist die Versuchung groß, den Beton durch die Zugabe von Wasser besser verarbeitbar zu machen. Doch bereits mit geringen Mengen zusätzlichen Wassers im Beton fällt die Festigkeit zwangsläufig ab; noch mehr aber leidet die Dauerhaftigkeit des Betons.

Faustregel

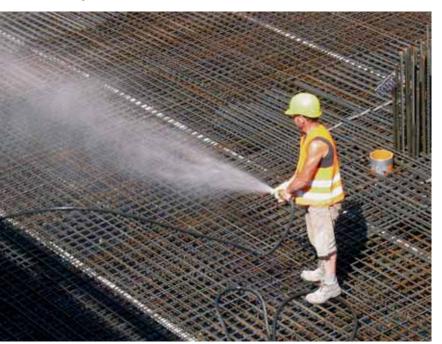
10 Liter mehr Zugabewasser pro m³ Beton verursachen einen 28-Tage-Druckfestigkeitsverlust von rund 3 bis 5 MPa.

Um den Betonfestigkeitsabfall bei heißer Witterung in engen Grenzen zu halten, schreibt die DIN 1045-3 eine Frischbetontemperatur von höchstens 30°C vor. Bei Beton, an den besondere Anforderungen gestellt werden, sollte die Frischbetontemperatur auf maximal 25°C begrenzt werden.

Neben dem Verlust an Endfestigkeit (Abb. 2.8.2) und Dauerhaftigkeit hat eine höhere Betontemperatur noch weitere unerwünschte Auswirkungen:

- Die schnellere Zementhydratation bewirkt ein rascheres oder sogar vorzeitiges Ansteifen des Betons, wodurch seine Verarbeitung beeinträchtigt wird (Kap. 2.4 «Verarbeitbarkeit und Konsistenz»).
- Die Betonoberfläche trocknet rascher aus. Dies gilt insbesondere bei hoher Windgeschwindigkeit, intensiver Sonneneinstrahlung und niedriger relativer Luftfeuchte. Die Nachbehandlung (Kap. 2.7 «Nachbehandlung») soll den Wasserentzug vermeiden, oder es muss für kontinuierliche Wasserzufuhr auf die Betonoberfläche gesorgt werden. Andernfalls bleibt die Zementhydratation unvollständig, wodurch die Endfestigkeit der vorzeitig ausgetrockneten, oberflächlichen Partien, insbesondere aber deren Dauerhaftigkeit, noch zusätzlich reduziert würde. Auch neigen solche Bauteile stark zum Frühschwinden und der damit zusammenhängenden Rissbildung (Kap. 3.2 «Rissbildung») sowie bei Sichtbeton zu hässlichen Unterschieden in den Grautönen.

Abb. 2.8.3 Benetzen der Schalung



Betonieren bei warmer Witterung

Maßnahmen zur Kontrolle der Betontemperatur

Die Temperatur T eines Frischbetons kann mit folgender Formel näherungsweise abgeschätzt werden:

$T_b = 0.7 \cdot T_g + 0.2 \cdot T_w + 0.1 \cdot T_z$

T_b: Betontemperatur

T_g: Gesteinskörnungstemperatur

 T_w : Wassertemperatur T_z : Zementtemperatur

Beispiel: Bekannt sind:

 $T_g = 21^{\circ}C$

 $T_{\rm w}$ = 15°C

 $T_7 = 50^{\circ}C$

Gesucht ist die Betontemperatur T_b:

 $T_h = 0.7 \cdot 21 + 0.2 \cdot 15 + 0.1 \cdot 50 = 22.7$ °C

Da die Zementtemperatur durch den Einbau von speziellen Kühlern in den Zementmahlanlagen auf 60°C oder weniger reduziert wird, ist ihr Einfluss auf die Betontemperatur relativ gering.

Maßnahmen zum Senken der Betontemperatur

- Anbringen einer Wärmeisolation am Kiessilo
- Kühlen des Grobkieses durch Besprengen mit
 Wasser 1)
- Kühlen des Zugabewassers mit Eis 1)
- Kühlen der Betonmischung mit flüssigem Stickstoff.
- ¹⁾Die Zugabewassermenge ist entsprechend zu reduzieren.

Betonieren bei warmer Witterung verlangt gute Planung und Vorbereitung

- Verwendung eines Zements mit moderater Wärmeentwicklung, z.B. Hochofenzemente (Holcim-Duo und Holcim-Aqua).
- Die Anlieferung und Verarbeitung des Frischbetons muss so koordiniert werden, dass der Beton zügig eingebaut werden kann.
- Für das Betonieren sind genügend Gerätschaften und Personal einzuplanen, damit das Einbringen, das Verdichten und die Nachbehandlung ohne Verzug erfolgen können.
- Unterlage und Schalung dürfen dem Frischbeton kein Wasser entziehen. Die Schalung ist deshalb vor dem Einbringen des Betons zu benetzen (Abb. 2.8.3). Übermäßiges Wässern von Schalung und Untergrund ist zu vermeiden (keine Wasserlachen).
- Sind die für ein erfolgreiches Betonieren bei hoher Temperatur erforderlichen Voraussetzungen aus bestimmten Gründen nicht gegeben, muss auf eine kühlere Tageszeit ausgewichen werden.
- Das Verwenden von Erhärtungsverzögerern kann die Nachteile der rascheren Zementhydratation weitgehend beheben. Sie sind aber wenig wirksam gegen vorzeitiges Ansteifen des Betons, auch erfordert ihr Einsatz eine verlängerte Nachbehandlung. Wenn die Wirkung eines bestimmten Verzögerers auf einen Zement nicht schon von früheren Verwendungen her bekannt ist, muss sie durch Vorversuche abgeklärt werden, um eine zweckentsprechende Verzögererdosierung zu ermöglichen.

Betonieren bei warmer Witterung

Einbringen und Verdichten

- Kurze Liegezeit und schnellstmögliche Verarbeitung des Frischbetons sind oberstes Gebot.
- Das Baustellenpersonal ist mit den Besonderheiten und Anforderungen des Betonierens bei hohen Temperaturen vertraut zu machen.
- Sind unvorhergesehene Wartezeiten nicht zu vermeiden, muss der Beton im Fahrzeug und im Umschlaggerät vor direkter Wind- und Sonneneinwirkung geschützt werden. Die Trommel des Fahrmischers kann dazu mit Wasser berieselt werden.
- Die nachträgliche Wasserzugabe auf der Baustelle ist streng zu verbieten, und das Einhalten des Verbots ist zu kontrollieren.

Nachbehandlung – die ersten Stunden nach dem Einbringen sind entscheidend

- Frühzeitige und fortgesetzte Nachbehandlung verhindert rasches Austrocknen, mindert die Rissgefahr und steigert zudem Dichtigkeit und Druckfestigkeit.
- Die Nachbehandlung muss unmittelbar nach dem Einbringen des Betons beginnen (Abb. 2.8.4 und 2.8.5).
- Die Nachbehandlung muss sich über mehrere Tage erstrecken. Detaillierte Angaben über ihre Dauer sind der DIN 1045-3 entnehmen. Sie ist u.a. abhängig von der Festigkeitsentwicklung des Betons.
- Über Nachbehandlungsverfahren, Nachbehandlungs- und Abdeckmittel orientiert das Kapitel 2.7 «Nachbehandlung».



Abb. 2.8.4 Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels unmittelbar nach dem Oberflächenfinish des Betons am Beispiel einer Fahrbahndecke



Abb. 2.8.5 Abdecken mit Kunststofffolien und Sichern mit Brettern

Betonieren bei kalter Witterung

Gefahren bei tiefer Temperatur

Der frische und junge Beton reagiert empfindlich auf tiefe Temperaturen und nimmt bei Frost Schaden. Die Gründe dafür sind:

- Die Festigkeitsentwicklung wird verlangsamt, je tiefer die Umgebungstemperatur liegt. Unter dem Gefrierpunkt kommt sie sogar zum Stillstand.
- Das Gefrieren des Wassers im Beton schädigt dessen Gefüge.

Geschädigter Beton muss entfernt werden.

Gefrierbeständigkeit

Beton kann als gefrierbeständig gelten, wenn:

- sein Zementgehalt > 270 kg/m³ beträgt
- sein w/z-Wert < 0,60 ist
- er vor starkem Feuchtezutritt geschützt ist
- er eine schnelle Festigkeitsentwicklung aufweist
- seine Temperatur während mindestens 3 Tagen bei > 10°C liegt.

Zu beachten ist:

- Gefrierbeständige Betone erhärten nach einmaligem Durchfrieren zwar normal weiter; mehrfaches Durchfrieren überstehen aber auch solche Betone nicht
- Luftporenbildner tragen nichts zur Gefrierbeständigkeit bei
- Die Zugabe von Beschleunigern führt wohl zu einem schnelleren Erhärten; dies ist aber nur schwer kontrollierhar

Kühle Witterung erfordert deshalb zusätzliche Maßnahmen bei der Herstellung und dem Einbau von Beton. Nach DIN 1045-2, Ziffer 5.2.8, darf die Temperatur des Betons beim Einbringen im Allgemeinen + 5 °C nicht unterschreiten. Bei Temperaturen unter – 3 °C muss die Betontemperatur mindestens drei Tage lang auf +10 °C gehalten werden.

Bei Betonoberflächen mit erhöhten Anforderungen wird empfohlen, die Frischbetontemperatur stets auf $+10\,^{\circ}\text{C}$ zu erhöhen.

Beton ist immer vor dem Gefrieren zu schützen, solange er eine Druckfestigkeit von 5 MPa noch nicht erreicht hat.

Maßnahmen zur Betonherstellung bei kühler Witterung

Schon bei der Betonherstellung kann die bei kühler Witterung erforderliche Festigkeits- und Wärme- entwicklung durch folgende Maßnahmen günstig beeinflusst werden:

- anheben der Frischbetontemperatur durch gezielte Erwärmung des Zugabewassers und/oder Erwärmung der Gesteinskörnung
- anheben des Zementgehalts und/oder Verwenden von Zement mit hoher Wärmeentwicklung (Holcim-Pur 4) bei sonst gleichen Ausgangsstoffen. Dadurch wird die Frühfestigkeit angehoben (nur in Absprache mit dem Statiker)
- herabsetzen des w/z-Werts durch Einsatz eines Fließmittels (FM). Beton mit weniger Überschusswasser ist weniger frostgefährdet
- beschleunigen der Festigkeitsentwicklung durch den Einsatz eines chloridfreien Erhärtungsbeschleunigers (BE)
- Bauteile oder ganzes Bauwerk vor Wärmeverlust und Luftzug schützen.

Abb. 2.9.1 Mindesttemperaturen von Luft und Beton

Lufttemperatur	Mindesttemperatur des Frischbetons beim Einbau				
+5°C bis –3°C	+5°C im allgemeinen Fall				
	+10°C bei < 240 kg/m³ Zement oder bei LH-Zementen				
<-3°C	+10°C sollte mindestens 3 Tage lang gehalten werden				

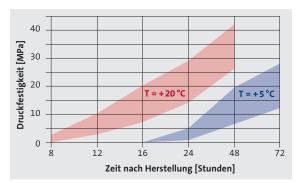


Abb. 2.9.2 Frühfestigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Zementen (CEM 32,5 R: untere Begrenzung, CEM 52,5 R: obere Begrenzung) und verschieden hohen Außentemperaturen (+5 und +20°C)

Betonieren bei kalter Witterung

Abb. 2.9.3 Messen der Betontemperatur





Abb. 2.9.4
Thermomatten schützen Betonwände und -stützen vor übermäßigem Wasserverlust und Abkühlung

Abb. 2.9.5 Nachbehandlung durch Wärmedämmung



Maßnahmen auf der Baustelle bei kühler Witterung

Betonieren bei niedrigen Außentemperaturen erfordert auch auf der Baustelle entsprechende Schutzmaßnahmen:

- es darf weder auf gefrorenem Baugrund noch auf gefrorenen Bauteilen betoniert werden
- der vorgewärmte Beton ist zügig in die von Schnee und Eis befreite Schalung einzubauen und sofort zu verdichten
- im Beton sind z.B. mit einem Rundstahl Einstechlöcher zu machen, um die Betontemperatur laufend messen zu können (Abb. 2.9.3)
- unmittelbar nach dem Einbringen muss der Beton vor Wärmeentzug geschützt werden. Damit wird die eigene Wärmeentwicklung durch die Zementhydratation aufrechterhalten. Als geeignetes Mittel erweist sich das Abdecken mit Thermomatten (Abb. 2.9.4)
- kann die Thermomatte nicht direkt auf die Betonoberfläche gelegt werden, ist der Beton vor Zugluft zu schützen
- während der Erhärtungszeit muss der Beton nicht nur vor Wärmeverlust, sondern auch vor Feuchtigkeitsverlust geschützt werden, weil bei kaltem und/oder trockenem Wetter der Feuchtigkeitsgehalt der Luft sehr gering ist
- sinkt die Betontemperatur während des Erhärtens zeitweise unter den Gefrierpunkt, sind die Ausschalfristen mindestens um die Anzahl der Frosttage zu verlängern.

Die Frischbetontemperatur lässt sich durch Erwärmen der Ausgangsstoffe erhöhen. Die vereinfachte Formel zur Berechnung der Frischbetontemperatur steht auf Seite 73.

Pumpfähiger Beton

Einsatzbereich

Das Einbringen von Beton erfolgt heute in der Regel über Betonpumpen. Pumpbeton kann praktisch für alle Bauteile eingesetzt werden, besonders wenn eine hohe Einbringleistung gefordert und/oder der Einbringort schwer zugänglich ist. Abb. 2.10.1 orientiert über die Leistungen von Betonpumpen. Generell wird zwischen stationären und Autobetonpumpen unterschieden (Abb. 2.10.2 bis 2.10.4).

Für kleine Förderleistungen und/oder Kubaturen eignet sich die Fahrmischerpumpe.

Anforderungen an Pumpbeton

Bei der Herstellung pumpfähiger Betonmischungen müssen bei der Mischungszusammensetzung bestimmte Regeln beachtet werden, damit der Frischbeton die für eine Rohrförderung notwendigen Eigenschaften erhält. Das Festlegen der Betonrezeptur sollte von sachkundigen Betontechnologen vorgenommen werden.

Beim Entwurf einer pumpfähigen Betonmischung müssen neben den verlangten Festbetoneigenschaften insbesondere die Kornzusammensetzung, der Zementund Mehlkorngehalt sowie der Mörtelgehalt und die Konsistenz beachtet werden.

Normalbetone nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 sind ab der Druckfestigkeitsklasse C20/25 sowie mit einer mindestens weichen Konsistenz in der Regel problemlos pumpbar.

Zement

Für die Herstellung von Pumpbeton eignet sich grundsätzlich jeder genormte Zement. Der Bindemittelgehalt für eine optimale Förderung des Frischbetons sollte mindestens 320 kg/m³ betragen. Zemente, die der Betonmischung eine hohe Kohäsion verleihen, sind besonders geeignet (z.B. Holcim-Ferro und Holcim-Duo).

Stationäre Pumpen und Autobetonpumpen					
Fördermenge pro Stunde	20 bis 150 m ³				
Förderdistanz	üblicher Bereich	bis 500 m			
	extremer Bereich	bis 2000 m			
Förderhöhe	Steigleitung ¹⁾	bis 400 m			
	Fallleitung ¹⁾	je nach Situation			

1) Am Anfang von Steigleitungen und am Ende von Fallleitungen hat sich der Einbau von Schiebern bewährt. Sie verhindern bei Betonierunterbrüchen oder Stopfern das Entleeren der Leitungen.

> Abb. 2.10.1 Leistungswerte von Betonpumpen

Kornzusammensetzung

- Sand: Es sollte eine stetige Kornverteilung im Sand angestrebt werden. Vielfach sind Schwankungen in der Kornverteilung die Ursache für ungenügende Pumpbarkeit.
- Korngruppe 4–8 mm: Die Pumpbarkeit verbessert sich durch ihr Weglassen. Ihr Anteil am Korngemisch ist anderenfalls auf 20% zu begrenzen.
- Kornform: Betonmischungen mit mehr als 20 Massenprozent gebrochener Gesteinskörner weisen einen höheren Hohlraumanteil auf als Betonmischungen mit natürlich gerundeten Gesteinskörnern. Deshalb erfordern Betonmischungen mit gebrochenen Gesteinskörnern eine höhere Zementdosierung.
- Mehlkorngehalt: Der höchst zulässige Mehlkorngehalt (Zement, Zusatzstoffe, Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm) gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 (Abb. 1.3.19) ist einzuhalten.





Abb. 2.10.2/ Abb. 2.10.3 Betonieren einer großen Bodenplatte. Einsatz mehrerer Betonpumpen gleichzeitig

Pumpfähiger Beton

Abb. 2.10.4 Verteilmast, beschickt durch stationäre Pumpe über lange Pumpleitung



Größtkorn	32 mm	16 mm
Feinstmörtelgehalt ≤ 0,125 mm ¹) , Angabe in Litern	ca. 300	ca. 330
Mörtelgehalt ≤ 2 mm ¹) , Angabe in Litern	ca. 530	ca. 570
Siebdurchgang bei 2 mm, Angabe in %	ca. 33	ca. 38

1) Wasser + Zement + Zusatzstoffe + Gesteinskörner

Abb. 2.10.5 Richtwerte für die Zusammensetzung von Pumpbetonmischungen

Zusatzstoffe

Insbesondere Steinkohleflugaschen mit ihrer kugeligen Teilchenform können bei einer Zudosierung von 30 bis 50 kg pro Kubikmeter Beton die Pumpbarkeit des Betons verbessern.

Zusatzmittel

Für den Einsatz von Zusatzmitteln (Kap. 1.4) gelten die gleichen Regeln wie bei nicht gepumptem Beton. Bei Zugabe von Luftporenbildnern ist darauf zu achten, dass diese die Förderleistung der Betonpumpen beeinträchtigen können. Werden Kolbenpumpen verwendet, können künstlich eingebrachte Luftporen durch den Pumpendruck zerstört werden. Dies ist ggf. bei der Festlegung der Dosierung des Luftporenbildners zu berücksichtigen.

Konsistenz

Der Pumpbeton sollte in der Regel folgende Frischbetonkonsistenzen aufweisen:

- Ausbreitmaß (F3): 420 bis 480 mm oder
- Verdichtungsmaß nach Walz (C3): 1,04 bis 1,10. Die erforderliche Konsistenz kann jedoch erheblich von den Eigenschaften des Sandes abhängen und muss gegebenenfalls aufgrund von Vorversuchen angepasst werden.

Faserbeton

Die Beigabe von Fasern vermindert die Fließfähigkeit des Pumpbetons. Ein erhöhter Zementleimgehalt kann dies wieder ausgleichen.

Hinweise für das Pumpen von Beton

- Ein reibungsloser Ablauf ist durch frühzeitige Absprache zwischen Betonpumpenbetreiber, Bauunternehmen und Betonlieferanten sicherzustellen.
- Die Pumpeninstallation und der Betrieb der Pumpe fallen unter die Verantwortlichkeit des Pumpenbetreibers.
- Die Anlieferungsfrequenz und die Förderleistung der Betonpumpe sind der Einbauleistung des Verarbeitungspersonals anzupassen.
- Der Transport des Pumpbetons zur Betonpumpe sollte zur Vermeidung jeglicher Entmischungen mit Fahrmischern erfolgen.
- Das zuständige Bauunternehmen ist für die fachgerechte Verarbeitung und die Nachbehandlung des Betons verantwortlich.
- Die zum Anpumpen erforderliche «Schmiermischung» in Form eines zementreichen Mörtels darf nicht für Betontragwerke verwendet werden.

Sicherheitsaspekte beim Einsatz von Betonpumpen

Das Fördern und Einbauen von Pumpbeton birgt Gefahren. Es muss insbesondere geprüft werden, ob:

- die Wand- und Stützenschalungen dem erhöhten Schalungsdruck des Pumpbetons angepasst sind
- Stromfreileitungen im Einsatzbereich verlaufen
- die Tragfähigkeit des Pumpeninstallationsplatzes genügt.

Die Anweisungen des Pumpenpersonals sind strikt zu befolgen.

Leichtbeton

Leichtbetone sind unter erhöhtem Anspruch an die Herstellung und Pumptechnik bedingt pumpbar. Die Erfahrung zeigt aber, dass die Pumpbarkeit bei Rohdichten von unter 1800 kg/m³ fast nicht mehr gegeben ist.

Leichtverdichtbarer Beton

Entwicklung

Seit Beginn des modernen Betonbaus ist eine kontinuierliche Zunahme der verwendeten Betonkonsistenzen zu beobachten. Im Wesentlichen ist dies auf die fortschreitende Entwicklung von geeigneten Betonzusatzmitteln zurückzuführen. Durch den Einsatz von Verflüssigern und Fließmitteln wird es möglich weiche Frischbetone mit hohen Druckfestigkeiten herzustellen (vgl. Kap. 1.4 «Zusatzmittel»). Anspruchsvolle Bauteile können so durch eine bessere Verarbeitbarkeit des frischen Betons mängelarmer und dauerhafter erstellt werden.

Die letzte Anhebung der Konsistenzobergrenze in Deutschland fand im Rahmen der Einführung des europäischen Normenwerkes EN 206 im Jahr 2001 statt. War die Konsistenz zuvor auf ein Ausbreitmaß von 60 cm begrenzt sind seitdem Ausbreitmaße von bis zu 70 cm durch die Betonnorm DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 möglich (vgl. Kap. 2.1 «Zusammensetzung des Betons»).

Als ursächlich dafür kann das Aufkommen des selbstverdichtenden Betons und der damit verbundenen Entwicklung einer neuen Fließmittelgeneration auf Polycarboxylatether-Basis (PCE) angesehen werden.

Durch die Anwendung dieser Technologien lassen sich sedimentationsstabile Betone hoher Konsistenzen verlässlich herstellen. In der Praxis bezeichnet man Betone der Ausbreitmaßklasse F6, mit einem Ausbreitmaß von 63cm bis 70cm, als leichtverdichtbare Betone. Sie sind ähnlich fließfähig wie selbstverdichtende Betone, fallen allerdings in den Regelungsbereich der DIN EN 206-1/DIN 1045-2.



Leichtverdichtbarer Beton F6

Leichtverdichtbarer Beton

Einsatzgebiete

Die Einsatzmöglichkeiten von leichtverdichtbaren Betonen sind vielfältig. Die leichte Verarbeitbarkeit bietet Vorteile bei dicht bewehrten sowie schlecht zugänglichen Bauteilen. Dies ist besonders dann der Fall, wenn anspruchsvolle Bauaufgaben realisiert werden sollen. Wasserundurchlässige Konstruktionen lassen sich bei-

Abb. 2.11.2 Sichtbetonflächen aus leichtverdichtbarem Beton



spielsweise sehr vorteilhaft erstellen. Insbesondere der Anschluss der Wände an die Sohlplatte ist aufgrund der schweren Zugänglichkeit beim Verdichten ein kritischer Punkt während der Bauausführung. Leichtverdichtbare Betone können hier besonders vorteilhaft eingesetzt werden und führen zu einer verbesserten Qualität der Wannenkonstruktion. Aufgrund ihrer Zusammensetzung bieten leichtverdichtbare Betone ein äußerst dichtes Betongefüge. Die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen kann so gesteigert werden.

Weitere Vorteile bietet leichtverdichtbarer Beton zur Herstellung von Sichtbetonflächen. Zum einen aufgrund eines einfachen und somit gleichmäßigeren Einbaus. Zum anderen werden unterschiedliche Schalhäute aufgrund der Materialeigenschaften des Betons optimal abgebildet.

Im Bereich des Wohnungsbaus wird leichtverdichtbarer Beton immer häufiger zur Herstellung von Sohl- und Bodenplatten verwendet. Gründe dafür sind der einfache und schnelle Einbau sowie eine bessere Qualität.



Abb. 2.11.3 Unkomplizierter Einbau und hohe Qualität. Leichtverdichtbarer, stahlfaserbewehrter Beton für einen Industrieboden

Leichtverdichtbarer Beton

Technologie

Die Fließfähigkeit leichtverdichtbarer Betone wird durch eine spezielle Betonzusammensetzung erreicht. Im Gegensatz zu Betonen vergleichbarer Druckfestigkeitsklasse und steiferer Konsistenz kann von einem erhöhten Mehlkorngehalt ausgegangen werden. Als Anhaltswert ist ein Bindemittelgehalt von circa 420 kg/m³ zu nennen. Als zweckmäßig hat sich die Verwendung von Steinkohlenflugasche oder Kalksteinmehl als Zusatzstoff erwiesen. Zusammen mit einem planmäßig moderaten bis niedrigen Wassergehalt wird so ein stabiler Leim erreicht. Als Fließmittel werden überwiegend Produkte auf Polycarboxylatether-Basis (PCE) verwendet. Der Einsatz von Kombinationsprodukten aus herkömmlichen Fließmitteln und Fließmitteln auf PCE-Basis ist ebenso denkbar. Vorteilhaft ist weiterhin die Verwendung von stabilisierenden Zusatzmitteln. Sie erhöhen die Robustheit des Frischbetons gegenüber naturgemäßen Einsatzstoffschwankungen. Für die Gesteinskörnung muss insbesondere dem Sand eine gesteigerte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Zu scharfe Sande wirken sich negativ auf die Sedimentationsstabilität aus. Die Fließfähigkeit des Frischbetons kann durch zu feine Sande, mit einem zu hohen Anteil abschlämmbarer Anteile, negativ beeinflusst werden. Aufgrund der mit steigendem Durchmesser zunehmenden Sedimentationsneigung ist das Größtkorn – ähnlich wie bei selbstverdichtendem Beton – auf 16 mm begrenzt.

Frischbetonprüfungen

Leichtverdichtbarer Beton wird hergestellt nach den Regeln der DIN EN 206-1/ DIN 1045-2. Demnach wird die Konsistenz durch die Prüfung des Ausbreitmaßes gemäß DIN EN 12 350-5 festgestellt. Eine qualitative Beurteilung von Fließverhalten und Sedimentationsstabilität sollte in jedem Fall erfolgen. Die Prüfung von Fließzeit und Setzfließmaß (vgl. Kap. 2.12 «Selbstverdichtender Beton») ist für leichtverdichtbare Betone normativ nicht erforderlich. Gleichwohl kann die Beurteilung von leichtverdichtbaren Betonen nach eben diesen Kriterien hilfreich sein. Sie kann sinngemäß mit den in DIN EN 12 350-5 vorgeschriebenen Prüfgeräten durchgeführt werden.

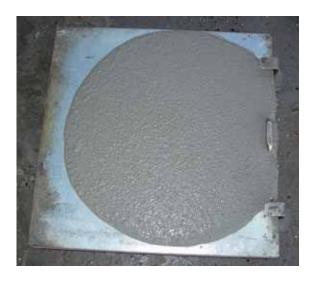


Abb. 2.11.4 Ausbreitmaßklasse F6

Herstellung von leichtverdichtbarem Beton im Transportbetonwerk

Leichtverdichtbarer Beton ist ein Beton mit besonderen Frischbetoneigenschaften.

Es dürfen ausschließlich geeignete Einsatzstoffe verwendet werden. Ähnlich wie bei selbstverdichtendem Beton ist ein Wechsel der Einsatzstoffe ohne vorige Prüfung nicht empfehlenswert. Für eine exakte Dosierung des Zugabewassers ist eine Erfassung der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung während der Produktion vorteilhaft.

Die Herstellung von leichtverdichtbarem Beton erfordert in der Regel eine längere Nassmischzeit. Als Richtwert kann von 60 Sekunden ausgegangen werden.

Leichtverdichtbarer Beton



Abb. 2.11.5 Konsistenzklasse F5/F6 direkt aus dem Fahrmischer

Verarbeitung auf der Baustelle

Wie aus der Namensgebung des Betons deutlich wird, bietet leichtverdichtbarer Beton optimale Verarbeitungseigenschaften. Gleichwohl ist vor Beginn und während des Betoneinbaus auf einige Besonderheiten zu achten. Die verwendete Schalung muss ausreichend dicht sein. Einbauteile müssen entsprechend gegen Auftrieb gesichert werden. Bei aufgehenden Bauteilen wie Wänden oder Stützen muss der erhöhte Schalungsdruck beachtet werden. Der Einbau erfolgt in der Regel mit der Betonpumpe. Das Einbringen mittels Krankübel ist ebenso möglich wie die Betonierung direkt aus dem Fahrmischer.

Abb. 2.11.6 Leichtverarbeitbare Betone vereinfachen den Einbau



Trotz seiner ausgezeichneten Fließeigenschaften ist leichtverdichtbarer Beton in der Regel nicht selbstnivellierend. Das bedeutet, dass die Herstellung von oberflächenfertigen Platten (z.B. Industrieböden, Bodenplatten oder Decken) ohne zusätzliche Bearbeitung des Frischbetons während des Einbaus nicht möglich ist. Eine Kontrolle der Einbauhöhen während des Betonierens muss erfolgen. Entlüftet wird der Beton in der Regel durch leichtes Stochern. Vom Rütteln des Frischbetons ist grundsätzlich abzuraten, da dies zu einer Sedimentation führen kann. Eine weitere Möglichkeit der Verdichtung bei plattenartigen, stahlfaserbewehrten Bauteilen ist das tiefe Eintauchen mit der so genannten Schwabbelstange. Die Betonoberfläche wird anschließend durch wellenartige Bewegungen mit der Schwabbelstange hergestellt. Dieser Arbeitsgang ersetzt das übliche Abziehen des höhengerecht eingebauten Betons. Die Nachbehandlung muss unmittelbar im Anschluss beginnen.

Selbstverdichtender Beton

Entwicklung

Selbstverdichtender Beton (Kurzform SVB) wurde Ende der 1980er Jahre in Japan entwickelt. Die selbstverdichtende Eigenschaft des Betons wird durch seine extrem hohe Fließfähigkeit erreicht. Diese ermöglicht, dass der Frischbeton entmischungsfrei durch die Schalung fließt und sich dabei selbständig entlüftet und somit verdichtet.

Wegen der speziellen Zusammensetzung solcher Betone sowie des sehr hohen Konsistenzmaßes fällt SVB aus dem Anwendungsbereich der DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 heraus. Bis Ende 2004 war für die Verwendung von SVB daher eine Zustimmung im Einzelfall oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nötig. Mit Aufnahme der DAfStB-Richtlinie «Selbstverdichtender Beton» in die Bauregelliste wurde diese Richtlinie Grundlage des Einsatzes von SVB. Eine Zustimmung im Einzelfall oder eine bauaufsichtliche Zulassung ist somit nicht mehr erforderlich.

Einsatzgebiete

Der Einsatz von SVB ist grundsätzlich in allen Bereichen des klassischen Betonbaus denkbar. Der erhöhte Aufwand bei der Produktion sowie die arbeitsvorbereitenden und überwachungsrelevanten Maßnahmen auf der Baustelle beschränken den Einsatz bis dato jedoch hauptsächlich auf Spezialanwendungen.

Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Herstellung von exponierten Sichtbetonflächen mit außergewöhnlichen Geometrien und hohen Bewehrungsgraden (sog. Architekturbeton).

Die Materialeigenschaften von SVB ermöglichen die Herstellung exzellenter Sichtbetonflächen. Diese meist sehr filigranen Bauteile sind in der geforderten Sichtbetonqualität häufig nur mit SVB herstellbar. Daneben

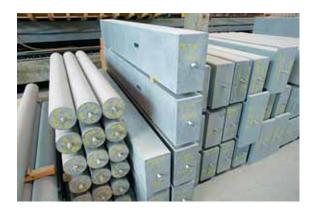




Abb. 2.12.2

Die Materialeigenschaften von SVB ermöglichen die Herstellung exzellenter Sichtbetonflächen trotz extrem hoher Bewehrungsgrade.

kommt SVB als Ortbeton vermehrt zum Einsatz, wenn das Betonieren mit konventionellen Betonen – meist aus Gründen mangelnder Zugänglichkeit bzw. Verarbeitungsmöglichkeit auf der Baustelle – nicht oder nur unter großem Aufwand möglich ist.

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet ist die Herstellung von Betonfertigteilen. Hohe Sichtbetonqualitäten sowie die idealen Einbaubedingungen bei der Betonfertigteilproduktion sind dafür entscheidend, dass SVB gerade in diesem Bereich eine immer größere Verbreitung findet.

Abb. 2.12.1 Betonfertigteile höchster Qualität hergestellt mit SVB

Selbstverdichtender Beton

Technologie

Im Gegensatz zum konventionellen Beton richtet sich beim SVB das Hauptaugenmerk auf die zu erzielenden Frischbetoneigenschaften. Die Rezepturentwicklung unterscheidet sich daher grundsätzlich von der konventioneller Betone. Die entscheidende Festbetoneigenschaft - die Druckfestigkeit - fällt beim SVB quasi als «Nebenprodukt» ab. Aufgrund der erhöhten Mehlkorngehalte und des Einsatzes spezieller Betonverflüssiger sowie der gleichzeitig sehr geringen Wassergehalte, ergeben sich in der Regel Betone der Druckfestigkeitsklassen C35/45 und höher. Niedrigere Druckfestigkeitsklassen als C30/37 sind schwierig herstellbar. Die Einhaltung der DAfStB-Richtlinie "Selbstverdichtender Beton" gewährleistet, dass die übrigen Festbetoneigenschaften (E-Modul, Schwinden, Kriechen) mit denen von Normalbetonen vergleichbar sind.

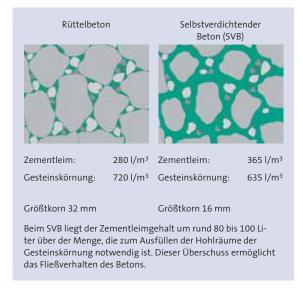
Für die Rezepturentwicklung stellt das in Japan entwickelte Verfahren nach Okamura bis heute die Grundlage dar. Ausgangspunkt ist die getrennte Beeinflussung von Viskosität und Fließgrenze des Frischbetons.

Durch Voruntersuchungen am Leim (Gemisch Zement, Zusatzstoff, Wasser) wird der Wassergehalt ermittelt, der noch nicht zum Fließen des Frischbetons beiträgt (ßp-Wert). Eine solche Leimsuspension verfügt über eine höchst mögliche Viskosität und stellt sicher, dass die schwereren Gesteinskörner nicht im Leim absinken und vom Beton in Fließrichtung mitgetragen werden.

Aus dem Leim wird unter Zugabe eines geeigneten Sandes 0/2 ein Mörtel hergestellt. Durch den Einsatz eines hochwirksamen Betonverflüssigers (meist Polycarboxylatether PCE) wird die Fließgrenze des Mörtels soweit abgesenkt, dass der Frischbeton später selbstständig ins Fließen gerät. Ist eine ausreichende Menge an fließfähigem Mörtel im Beton enthalten, schwimmen die Gesteinskörner im Mörtel und werden von ihm in Fließrichtung mittransportiert ohne z.B. vor Bewehrungen zu blockieren. Mit zunehmendem Korndurchmesser steigt die Gefahr der Sedimentierung, d.h. das Absinken der Gesteinskörnung im Mörtel, so dass SVB in der Regel mit einem maximalen Größtkorn von 16 mm hergestellt wird.

Der Auswahl der Einsatzstoffe kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie die Leistungsfähigkeit des SVB maßgebend beeinflussen. Ein Wechsel einer Komponente kann zum Kollaps des gesamten Systems SVB führen.

Abb. 2.12.3 Unterschiedliche Volumenverhältnisse von Rüttel- und selbstverdichtendem Beton



Selbstverdichtender Beton

Frischbetonprüfungen

Die Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften eines SVB sind vielfältig. Deshalb ist der Umfang der Frischbetonprüfungen umfangreicher als der konventioneller Betone.













Wird die Konsistenz konventioneller Betone durch ein Konsistenzmaß bzw. Verdichtungsmaß angegeben, reicht diese Messmethode bei der Frischbetonbeurteilung von SVB nicht mehr aus. Zur Beurteilung der rheologischen Eigenschaften von SVB müssen Viskosität und Fließgrenze gemessen werden. Dies führt zu zwei Messwerten. Die Fließgrenze wird dabei durch das sog. Setzfließmaß FB oder Slump Flow (vgl. Ausbreitmaß, jedoch ohne 15 Hübe) abgeschätzt. Dafür wird ein Setztisch mit einer Kantenlänge von 900 mm verwendet.

Ein Anhaltswert für die Viskosität wird durch die Fließzeit (entweder relative Trichterauslaufzeit oder Fließzeit t₅₀₀) ermittelt. In der Praxis ist die Fließzeit t₅₀₀ geeigneter, da sie zusammen mit der Prüfung des Setzfließmaßes ermittelt werden kann. Dazu wird die Zeit gemessen, die

der Beton nach dem Ziehen des Setztrichters benötigt, um auf einen Durchmesser von 500 mm zu fließen. Der Blockier- oder J-Ring dient zur Beurteilung der Blockierneigung des SVB.

Die in der Erstprüfung ermittelten Zielwerte und zulässigen Toleranzen der Konsistenz werden durch Angabe eines Verarbeitbarkeitsbereiches dargestellt. Er ist maßgebend für die Annahmeprüfung auf der Baustelle. Zu beachten ist dabei die Frischbetontemperatur, da diese erheblichen Einfluss auf die zielführenden Betoneigenschaften hat. Für unterschiedliche Frischtemperaturbereiche werden in der Regel unterschiedliche Verarbeitbarkeitsbereiche notwendig.



Abb. 2.12.5 Überprüfung der Blockierneigung mit dem **Blockierring**

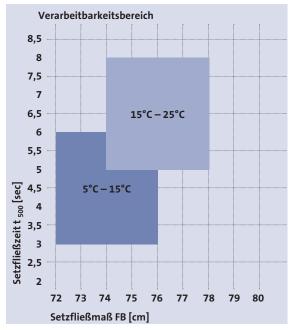


Abb. 2.12.6

Die Frischbetoneigenschaften des SVB werden in einem Verarbeitbarkeitsbereich dargestellt. Für die Verarbeitung des Betons auf der Baustelle ist dieser in jedem Fall einzuhalten.

Selbstverdichtender Beton



Herstellung von SVB im Transportbetonwerk

Für den erfolgreichen Einbau von SVB ist die zielsichere Herstellung im Transportbetonwerk von entscheidender Bedeutung.

Neben der kontinuierlichen Überwachung der Einsatzstoffe sind weitere Maßnahmen zur Qualitätssicherung notwendig.

Aufgrund der erheblichen Sensibilität des Frischbetons gegenüber Wassergehaltsschwankungen ist eine Erfassung der Feuchten der Gesteinskörnung während der Produktion unabdingbar. Dies kann durch Feuchtemesssonden geschehen. Der planmäßig niedrige Wassergehalt sowie die Tatsache, dass sich die volle Wirkung des PCE-Betonverflüssigers erst nach einer gewissen Zeit einstellt, führt zu deutlich erhöhten Mischzeiten.

Abb. 2.12.8

Der Einbau von SVB sollte mit einer Betonpumpe erfolgen. So wird ein kontinuierlicher und zügiger Betonfortschritt sichergestellt.

Verarbeitung auf der Baustelle

Zum Sicherstellen eines qualitätsgerechtes Einbaus sollte ein Betonierkonzept vorhanden sein.

Weiterhin ist ein Prüfplan für die erforderlichen Abnahmeprüfungen sinnvoll. Die notwendigen Abnahmeprüfungen sind in der DAfStB-Richtlinie «Selbstverdichtender Beton» beschrieben.

Je nach Verwendung des SVB sind einige Besonderheiten zu beachten. Beim Betonieren von vertikalen Bauteilen ist – ohne vorherige Prüfung – von hydrostatischem Schalungsdruck auszugehen. Generell sollte die

Forderung nach einem kontinuierlichen und zügigen Betoneinbau gestellt werden. Bei längerer Ruhezeit des Frischbetons kann es wegen des thixotropähnlichen Verhaltens von SVB zur sog. Elefantenhautbildung kommen (Abb. 2.12.7). Diese kann sich später auf der Betonfläche zeigen oder, bei starker Ausprägung, sogar zum Verlust des Verbundes führen. In diesem Zusammenhang muss auch beachtet werden, dass die Entlüftung von SVB ausschließlich während des Fließvorganges stattfindet. Daher muss grundsätzlich eine ausreichende Fließstrecke zur Verfügung stehen. Dies bedeutet ebenso, dass möglichst wenig Einfüllstellen vorgesehen werden sollten.

Im Bereich der Einfüllstellen ist es vorteilhaft, den Beton zusätzlich durch Stochern zu entlüften, da es dort vermehrt zu Lufteinschlüssen kommen kann. Ein Rütteln darf in gar keinem Fall geschehen. Mit zunehmender Schergeschwindigkeit sinkt die Viskosität des Frischbetons, wodurch die Gefahr des Entmischens besteht.





Stahlfaserbeton

Entwicklung

Stahlfaserbeton kommt in Deutschland ungefähr seit Mitte der 1970er-Jahre zum Einsatz. Er wurde zur Herstellung von Fuß- und Industrieböden sowie zur temporären Gewölbesicherung im Tunnelbau verwendet. Bis heute sind dies wesentliche Einsatzgebiete für Stahlfaserbeton.

Die fortschreitende Entwicklung hat seitdem zu einer Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten von Stahlfaserbeton geführt. Von entscheidender Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die stärkere Eigenschaftsorientierung der verwendeten Stahlfaserbetone. Mit der Veröffentlichung des Merkblattes Stahlfaserbeton des Deutschen Beton- und Bautechnikvereins e.V. im Oktober 2001 wurde die Grundlage zur Anwendung, Bemessung, Herstellung, Prüfung und zum Einbau von eigenschaftsorientiertem Stahlfaserbeton geschaffen.

Sie diente ebenso als Vorlage für die voraussichtlich in Kürze erscheinende Richtlinie Stahlfaserbeton des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb).

Eigenschaften und Anwendungen

Im Gegensatz zu unbewehrtem Beton ist Stahlfaserbeton ein duktiler Baustoff. Durch die eingebrachten Stahlfasern können Kräfte im gerissenen Zustand übertragen werden. Die Leistungsfähigkeit des Stahlfaserbetons wird neben dem Stahlfasergehalt ebenso von der Stahlfaserart sowie von der Qualität des Ausgangsbetons bestimmt. Zu beachten ist, dass bei üblichen Stahlfaser gehalten (20 kg/m³ bis ca. 50 kg/m³) in der Regel mit einem unterkritischen Materialverhalten zu rechnen ist. Die zum Erstriss führende Spannung kann vom Stahlfaserbeton nicht komplett aufgenommen werden. Sie wird in geringer belastete Bauteilabschnitte verteilt und führt zu einer optimalen Ausnutzung des Tragsystems. Der konstruktive Einsatz von ausschließlich mit Stahlfasern bewehrtem Beton beschränkt sich daher grundsätzlich auf statisch unbestimmte Systeme – z.B. Bodenplatten. Eine statische Berechnung zur Verwendung von Stahlfaserbeton ist immer erforderlich.

Stahlfaserbeton kann ebenso in schlaff bewehrten Bauteilen zum Einsatz kommen. Die Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton kann beispielsweise zur Begrenzung der Rissbreite für wasserundurchlässige Konstruktionen herangezogen werden. Bei stark bewehrten Bauteilen kann der Bewehrungsgehalt reduziert und das Bauteil problemloser betoniert werden. Die Bauteilqualität wird so erhöht.

Durch die Verwendung von Stahlfasern können weitere Eigenschaften des Betons verbessert werden. Stahlfaserbeton besitzt eine höhere Grünstandsfestigkeit, eine erhöhte Schlagzähigkeit, ein verbessertes Dauerschwingverhalten sowie einen erhöhten Verschleißwiderstand. Weiterhin sind Bauteile aus Stahlfaserbeton bis in die Randzone bewehrt. Zum einen schützt dies Bauteilkanten und -ecken vor Beschädigungen durch Schlag. Zum anderen führt die positive Beeinflussung der Rissneigung und -entwicklung in der Randzone zu einem dichteren Betongefüge. Dadurch kann die Dauerhaftigkeit von Bauteilen gesteigert werden.



Abb. 2.13.1 Herstellung der längsten monolithischen Bodenplatte der Welt mit Stahlfaserbeton (Petra III, DESY – Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg)

Stahlfaserbeton

Abb. 2.13.2 Gekröpfte Stahldrahtfasern

Technologie

In der Praxis wird üblicher Weise die Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton ausschließlich durch Angabe des Stahlfasergehaltes festgelegt. Dieser Ansatz kann jedoch unsicher oder unwirtschaftlich sein, da er nicht alle Einflussfaktoren für die Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton berücksichtigt.

Der Ansatz entspräche der Festlegung der Betondruckfestigkeit durch die Vorgabe eines Zementgehaltes, ohne zusätzliche Parameter wie Wasserzementwert, Sieblinie oder aber den Einsatz von Zusatzmitteln zu berücksichtigen.

Für einen sicheren und wirtschaftlichen Einsatz von Stahlfaserbeton wird daher ein eigenschaftsorientierter Ansatz dringend empfohlen.

So ist bei Stahlfaserbeton von einem höheren Bindemittelgehalt auszugehen. Dies kann zum einen die Anhebung des Zementgehaltes oder aber den Einsatz von Füllern wie Steinkohlenflugasche bedeuten. Dadurch soll eine gute Einbindung der Fasern in die Zementmatrix sichergestellt werden. Das verwendete Größtkorn sowie die eingesetzte Stahlfaser müssen aufeinander abgestimmt sein, um eine möglichst optimale Verankerung der Stahlfaser zu erreichen. Bei üblichen Faserlängen von 50 mm sollte das Größtkorn 16 mm nicht überschreiten. Ebenso spielt der Faserdurchmesser eine entscheidende Rolle, da mit abnehmendem Durchmesser die Anzahl der zur Verfügung stehenden Fasern je Kilogramm erhöht wird. Die zusätzliche Oberfläche der Stahlfasern führt zu einer steiferen Betonkonsistenz im Vergleich zum Ausgangsbeton. Daher ist die planmäßige Zugabe von Fließmitteln immer zwingend erforderlich. Übliche Zielkonsistenzen sind F3 bzw. F4. Bei der Herstellung von Stahlfaserbeton ist auf eine homogene Untermischung der Fasern zu achten. Am besten ist dies durch die Zugabe der Stahlfasern im Transportbetonwerk zu erreichen.

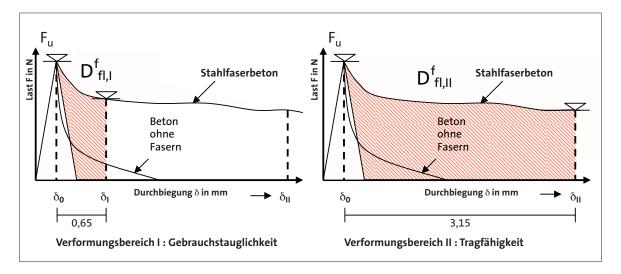


Festbetonprüfungen

Die Herstellung von Stahlfaserbeton sollte auf Grundlage des DBV-Merkblattes Stahlfaserbeton erfolgen. Sollen baurechtlich relevante Bauteile ausgeführt werden, muss auf entsprechende Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassungen zurückgegriffen werden. Grundsätzlich sind die geforderten Stahlfaserbetoneigenschaften durch eine Erstprüfung nachzuweisen. Die Konformität ist durch eine entsprechende werkseigene Produktionskontrolle zu bestätigen.

Zur Prüfung der Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton werden sogenannte Biegebalken verwendet. Für eine Prüfserie werden mindestens 6 Biegebalken empfohlen. Als Ergebnis der weggesteuerten Prüfung erhält man die Faserbetonklassen für den Verformungsbereich I und II. Sie charakterisieren das Arbeitsvermögen des Stahlfaserbetons. Die ermittelten Werte können zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sowie der Tragfähigkeit vom Planer verwendet werden.





Stahlfaserbeton

Holcim Steelpa C30/37 XC4 XI		DBV-Merkl	klassen nach platt «Stahlfaserbeton» r flächenhafte Bauteile	
Steelpact 10	Faserbetonklasse 1,0/0,8 Charakteristischer Wert der äquivalenten Zugfestigkeit: 1,0 N/mm² im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 0,8 N/mm² im Grenzzustand der	Faser- beton- klasse	Ergebnisse der Versuchs- auswertung in N/mm ² < 0,4	charakteristischer Wert der äquivalen- ten Zugfestigkeit in N/mm²
	Tragfähigkeit	0,4	$0.4 < f_{eq,ctm,i} < 0.6$	0,4
C30/37	Druckfestigkeitsklasse	0,6	0,6 < f _{eq,ctm,i} < 0,8	0,6
XC4 XF1 XM1	Expositionsklassen	0,8	0,8 < f _{eq,ctm,i} < 1,0	0,8
F3	Konsistenz F3, weich		eq,ctm,i	-,-
16	Größtkorn 16 mm	1,0	$1.0 < f_{eq,ctm,i} < 1.2$	1,0

Abb. 2.13.4
Bezeichnung von
Holcim Steelpact®

Herstellung im Transportbetonwerk

Stahlfaserbeton sollte in einem Transportbetonwerk hergestellt werden. Die Stahlfasern werden während des Herstellungsprozesses in den Fahrmischer dosiert und so optimal untergemischt. Die nachträgliche Zugabe der Stahlfasern auf dem Werksgelände ist ebenso möglich. Dafür bieten Dosierbänder sowie Einblasgeräte Vorteile, da mit moderater Mischleistung bereits eine optimale Durchmischung der Fasern im frischen Beton erreicht wird. Werden Aufzüge verwendet, ist auf eine ausreichende Mischzeit zu achten. Als Richtwert kann von einer Minute je Kubikmeter, mindestens jedoch 5 Minuten, ausgegangen werden.

Grundsätzlich sollte die Ausgangskonsistenz des Betons im Bereich plastisch bis weich liegen, um eine gute Vermischung der Stahlfasern zu erreichen.



Abb. 2.13.4/2.13.5 Zugabe der Stahlfasern im Transportbetonwerk

Verarbeitung auf der Baustelle

Die Verarbeitungskonsistenz sollte zwischen F3 und F4 liegen. Eine steifere Konsistenz – z.B. zur Herstellung eines Gefälles – ist ebenso möglich. Stahlfaserbeton muss grundsätzlich verdichtet werden. Die Verdichtungsintensität ist auf die gewählte Konsistenz abzustimmen. Auf ein ausgiebiges Nachverdichten sollte möglichst verzichtet werden, um Sedimentationen oder ungewollte Faserorientierungen zu vermeiden. Im Zweifelsfall wird eine enge Abstimmung zwischen den Bauausführenden und dem Stahlfaserbetonlieferanten empfohlen. Nach Fertigstellung des Bauteiles ist unmittelbar mit der Nachbehandlung zu beginnen.



Abb. 2.13.6/2.13.7 Einbringen und Verdichten von Stahlfaserbeton



Beton für wasserundurchlässige Bauwerke

Wasserundurchlässige Betone (WU-Betone) weisen einen hohen Wassereindringwiderstand nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 auf. Sie werden in aller Regel zur Herstellung von wasserundurchlässigen Bauwerken verwendet. Zur Planung und Ausführung ist die Richtlinie "Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton" des DAfStb (WU-Richtlinie) anzuwenden.

Die WU-Richtlinie behandelt teilweise oder vollständig ins Erdreich eingebettete Betonbauwerke und -bauteile, bei denen der Beton die lastabtragende Funktion und jene der Wasserundurchlässigkeit grundsätzlich auch ohne zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen übernimmt.

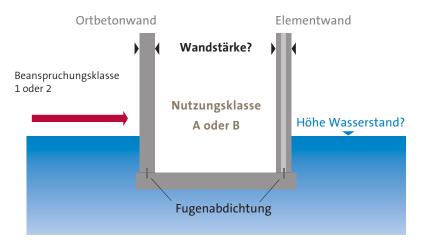


Abb. 2.14.1 Beanspruchungsund Nutzungsklassen bei WU-Betonen

Rissbreiten im Beton

Sämtliche Trennrisse sind durch geeignete Maßnahmen der Planung und Ausführung gegen Wassereintritt zu sichern. Soll von einer selbstheilenden Wirkung des Betons durch die Neubildung von Calciumcarbonat ausgegangen werden, dürfen die maximalen Trennrissbreiten höchstens 0,2 mm betragen. Sämtliche andere Stellen (Fugen und Sollrissquerschnitte) müssen durch geeignete Maßnahmen abgedichtet werden.

Beanspruchungs- und Nutzungsklassen

Für auf ein Bauwerk einwirkendes Druckwasser gilt Beanspruchungsklasse 1.

- drückendes Wasser (Überwachungsklasse 2)
- nicht drückendes Wasser mit einem Bemessungswasserstand von 10 cm über Gebäudeunterkante (Überwachungsklasse 2)
- zeitweise aufstauendes Sickerwasser mit einem Grundwasserstand von mindestens 30 cm unter Gebäudeunterkante (Überwachungsklasse 1)

Für auf ein Bauwerk einwirkende Bodenfeuchte gilt Beanspruchungsklasse 2.

- Bodenfeuchtigkeit (Überwachungsklasse 1)
- nicht stauendes Sickerwasser (Überwachungsklasse 1).

Für das Rauminnere werden zwei Nutzungsklassen unterschieden, Nutzungsklasse A für Räume ohne Feuchtetransport oder Feuchtestellen auf der raumseitigen Oberfläche und Nutzungsklasse B für Räume, in denen an Fugen, Rissen und am Beton selber Feuchtstellen auftreten dürfen. Raumklimatisch oder bauphysikalisch wirksame Maßnahmen müssen beachtet werden.

Planung eines wasserundurchlässigen Bauwerkes

Neben der Wahl des geeigneten Betons, der Bauteilabmessungen und der Bewehrungsführung gilt das Hauptaugenmerk dem Vermeiden von Rissen bzw. der dauerhaften Abdichtung von planmäßigen Rissen und der Begrenzung der Rissbreiten. Dazu sind sämtliche Fugen und Durchdringungen zu planen und der Bauablauf, Betonierabschnitte, Arbeitsfugen und Sollrissquerschnitte («Scheinfugen») festzulegen sowie die auf den Beton wirkenden Wässer und Böden zu berücksichtigen. Ein Bodengutachten liefert die nötigen Informationen zur Art des Wasseranfalls (drückendes Wasser, usw.), zum Bemessungswasserstand sowie zum chemischen Angriffsgrad des Wassers bzw. Bodens.

Bauteil	[cm]	Zusätzliches
Wände	24	w/z ≤ 0,55, C30/37, D _{max} 16
Elementwände	24	w/z ≤ 0,55, C30/37, D _{max} 16 und Anschlussmischung D _{max} 8
Bodenplatte	25	w/z ≤ 0,55

Abb. 2.14.2

Beanspruchungsklasse 1: Drückendes und nichtdrückendes Wasser und zeitweise aufstauendes Sickerwasser (Empfehlung)

Beton für wasserundurchlässige Bauwerke

Vorschriften der WU-Richtlinie

In Abhängigkeit der Beanspruchungsklasse sowie des Bauteiles schreibt die WU-Richtlinie minimale Bauteilbreiten vor. Darüber hinaus stellt sie Anforderungen an die Druckfestigkeitsklasse des Betons, an den Wasserzementwert, an das Größtkorn und an die Konsistenz oder schreibt Anschlussmischungen vor, wenn die Fallhöhe beim Einbringen eines Wandbetons einen Meter übersteigt.

Bei Ausnutzung der Mindestbauteildicken gelten folgende Anforderungen:

- w/z-Wert ≤ 0,55
- Druckfestigkeit C30/37
- Größtkorn max. 16 mm.

Bauteil	[cm]	Zusätzliches
Wände	20	
Elementwände	20	Anschlussmischung D _{max} 8
Bodenplatte	15	

Fugen und Durchdringungen

Alle Bauwerksfugen und Durchdringungen müssen grundsätzlich wasserundurchlässig ausgebildet werden. Gemäß WU-Richtlinie dürfen Fugenbänder nach DIN 7865, DIN 18541 und DIN 18197 sowie Fugenbleche nach DIN EN 10088-2 oder DIN EN 10051 verwendet werden. Für alle weiteren Produkte ist der Nachweis ihrer Verwendbarkeit zu erbringen.

Abb. 2.14.3
Beanspruchungsklasse 2:
Bodenfeuchte und
nichtaufstauendes
Sickerwasser

Konstruktive Hinweise

Um Risse aus Zwangsspannungen zu vermeiden, soll die Bodenplatte möglichst gleitend gelagert werden; eine über ihre ganze Fläche tragende, dickere Bodenplatte weist ein günstigeres Verhalten auf als eine dünne mit Streifenfundamenten. Ebenso sind Querschnittsschwächungen in der Wand oder Absätze in der Sohle oder den Wänden zu vermeiden, da solche Übergänge rissanfällig sind.

Festlegung eines WU-Betons

- Zwei Beanspruchungsklassen
- Zwei Nutzungsklassen
- Beton \ge C25/30; w/z_{max} = 0,60; z_{min} = 280 kg/m³
- Mindestwandstärken
- Reduzierung des w/z-Werts bei Ausnutzung der Mindestwandstärken
- Überwachungsklasse 2 bei drückendem Wasser
- Nachbehandlung zwingend notwendig.



Abb. 2.14.4 Entmischung an der Betonierfuge



Abb. 2.14.5
Abdichtungen mit Fugenblech (oben) und Fugenband (oben rechts)



Hochfester Beton

Ab einer Festigkeit von C55/67 bzw. von LC55/60 (vgl. Abb. 2.2.10) gelten Betone als hochfest. Sie zeichnen sich durch ein dichtes und homogenes Gefüge mit einem geringen Kapillarporenanteil aus. Von Normalbeton unterscheidet sie ein tieferer w/z-Wert, die Zugabe von leistungsfähigen Fließmitteln, die Verwendung von Silicastaub als Betonzusatzstoff und der Einsatz von Zementen hoher Festigkeitsklassen. Mit hochwirksamen Fließmitteln, sehr niedrigen Wasserzementwerten und der Zugabe von Silicastaub lassen sich Betonfestigkeiten von bis zu 120 MPa erzielen.

Derzeit befinden sich Mörtel und Betone mit Druckfestigkeiten von bis zu 800 MPa und Biegezugfestigkeiten von bis 50 MPa (sogenannte ultrahochfeste Betone) in der praktischen Erprobung.

Hochfeste Betone erlauben deutlich geringere Durchmesser oder Wandbreiten, was Platz spart und den Betonverbrauch reduziert. Gerade bei Säulen und Stützen werden häufig kleinere Durchmesser gefordert. Auch für Fertigteilwerke ist hochfester Beton interessant, da die Fertigteile so deutlich leichter werden, was den Transport wesentlich vereinfacht und verbilligt. Die häufigsten Einsatzbereiche sind:

- konstruktiver Hochbau
- Stützen, Wände
- Brückenbau
- druckbeanspruchte, schlanke Tragglieder
- Hochhausbau.



Abb. 2.15.2 Über zwei Stockwerke reichende Stützen, die hohen Lasten widerstehen müssen





Wasserzementwert und Gesteinskörnung

Normalfeste Betone weisen in der Regel w/z-Werte von 0,5 bis 0,6 auf. Dieser Wert reduziert sich bei hochfesten Betonen auf 0,35 bis 0,25. Damit enthalten diese Betone weniger Wasser, als sie zur vollständigen Hydratation des Zements benötigten (w/z ~ 0,40). Der Zementstein bleibt so fast frei von ungebundenem Wasser, was die Bildung von Kapillarporen vermindert. Der verbleibende, unhydratisierte Zement wirkt als hochfester «Zuschlag», der einen optimalen Verbund zum umgebenden Zementstein aufweist.

Bei hochfesten Betonen wird auch die Druckfestigkeit der Gesteinskörnung bedeutsam. Es eignet sich eigentlich nur noch gebrochene Körnung, beispielsweise ein Basaltsplitt.

Hochfester Beton

Fließmittel und Silicastaub

Baustellengerecht verarbeitbare Betone mit niedrigen Wasserzementwerten lassen sich nur mit Hilfe leistungsfähiger Fließmittel herstellen. Deren Wirkung beruht auf einer Zerstreuung der Zementagglomerate und einer Art Schmierwirkung.

Die Zugabe von Microsilica versteift den Frischbeton und macht diesen «klebriger». Deshalb ist eine fließfähige Konsistenz mit einem Ausbreitmaß von mehr als 490 mm anzustreben.

Durch das Beimengen feinster Zusatzstoffe ergeben sich höhere Betonfestigkeiten. Üblicherweise wird hochfesten Betonen daher Silicastaub zugegeben. Dabei handelt es sich um amorphes Siliciumdioxid, das bei der Herstellung von Siliciummetallen und Ferrosilicium entsteht und mit Elektrofiltern aus Rauchgasen gewonnen wird. Die Silicapartikel sind rund 30 bis 100 Mal kleiner als die Zementkörner. Ihre festigkeitssteigernde Wirkung ist durch drei Effekte zu erklären:

- Aufgrund ihrer Gestalt und Größe können Silicapartikel einen Teil des Porenraumes zwischen den Zementkörnern auffüllen. Damit wird die aufgrund der dispergierenden Wirkung der Fließmittel bewirkte Gefügeverdichtung des Zementsteins noch einmal deutlich gesteigert und eine höhere Dichte erreicht (Microfüllereffekt).
- Zusätzlich zur Zementhydratation läuft eine puzzolanische Sekundärreaktion zwischen dem bei der Zementhydratation entstehenden Calciumhydroxid und dem Silicastaub ab, bei der das härtere Calciumsilicahydrat gebildet wird.

Die Mikrostruktur in der Verbundzone zwischen Zementstein und Gesteinskorn wird deutlich verbessert.
 Der Grund ist eine Reduzierung des Calcium- und Ettringitgehaltes in der Kontaktzone. Dies lässt sich auch an den Bruchflächen von hochfesten Betonprüfkörpern erkennen: Diese sind relativ glatt, und der Bruch erfolgt nicht wie bei normalfestem Beton um die Körner herum, sondern durch die Gesteinskörnung hindurch.

Wesentlich sind die Füllereigenschaften und der verbesserte Verbund. Die puzzolanische Sekundärreaktion trägt nur rund 20% zur Festigkeitssteigerung bei.

Verringerter Brandwiderstand

Das dichte und homogene Gefüge des hochfesten Betons mit seinem geringen Kapillarporenanteil garantiert bei Normaltemperatur eine hohe Festigkeit, wirkt sich jedoch unter Brandbeanspruchung ungünstig aus. Bei Temperaturen von etwa 150°C verdampft auch das physikalisch gebundene Wasser im Zementstein. Kann der dabei entstehende Dampfdruck wegen des dichten Gefüges nicht über die Kapillarporen entweichen, führt er zu Betonabplatzungen. Bei höheren Festigkeiten sind deshalb Zusatzmaßnahmen erforderlich. Entweder lässt sich die Betondeckung durch eine oberflächennahe Netzbewehrung gegen Abplatzen sichern oder es werden dem Beton Polypropylenfasern beigemischt. Im Brandfall verbrennen oder schmelzen die Fasern und hinterlassen röhrenförmige Poren, die für den Abbau des Wasserdampfdruckes sorgen.





Abb. 2.15.3 Bruchbilder von Normal- und hochfestem Beton. Der Bruch geht beim hochfesten Beton (rechts) durch das Gesteinskorn

Sichtbeton

Unter Sichtbeton werden im Allgemeinen Betonflächen verstanden, die für den Betrachter als Oberfläche sichtbar bleiben und an die hinsichtlich des Aussehens besondere Anforderungen gestellt werden. Es bestehen keine verbindlichen Vorschriften zur Planung, zur Betonzusammensetzung, zur Bauausführung oder zur

Abb. 2.16.1 Holcim Chamäleon – die Sichtbeton-Systemlösung von Holcim



Beurteilung von Sichtflächen. In diesem Zusammenhang ist das Merkblatt Sichtbeton des Deutschen Beton- und Bautechnikvereines e. V. zu nennen. Es besitzt zwar keinen Normen- oder Richtliniencharakter, stellt aber eine gute Grundlage für Planer, Ausführende und Bauherren dar. Mit dem Merkblatt wird die Möglichkeit eröffnet, Sichtbetonflächen präzise zu planen, auszuführen und letztendlich zu beurteilen. Es kann in den Bauvertrag eingebunden werden.

Die Ansichtsfläche wird beeinflusst von:

- Art und Material der Schalung
- Einsatzhäufigkeit und Reinigungszustand der Schalung
- Dichtigkeit der Schalung
- Anordnung der Bindestellen
- Steifigkeit des Schalungssystems
- Menge und Art des Trennmittels
- Betonzusammensetzung und -herstellung
- Einbau und Verdichten des Betons
- Witterung bei Herstellung und Nachbehandlung.

Im Wesentlichen unterscheidet man bei der Herstellung von Sichtbetonflächen zwischen den Oberflächen, bei denen die Schalhaut als Gestaltungselement benutzt wird, und Betonflächen, die nachträglich bearbeitet werden. In beiden Fällen kann die Farbe als weiteres gestalterisches Merkmal eingesetzt werden.

Eine hohe Gleichmäßigkeit der Sichtbetonqualität lässt sich nur erzielen, wenn außer besonderen Anforderungen an die Schalhaut auch hohe Anforderungen an die Betonzusammensetzung, Betonherstellung und die Betonverarbeitung gestellt werden.

Ausgangsstoffe

Zement

Für die Herstellung von Sichtbeton sind alle Zemente nach DIN EN 197-1 geeignet. Da die Farbe der Betonoberfläche von der Farbe des Zements beeinflusst wird, soll während der Ausführung eines Objekts weder die Zementsorte noch das Lieferwerk gewechselt werden.

- Portlandzement (z.B. Holcim-Pur) ergibt Betonflächen mit einem typischen Grauton.
- Hochofenzement (z.B. Holcim-Duo oder Holcim-Aqua) führt wegen des Hüttensandgehalts im ausgetrocknetem Zustand zu deutlich helleren Oberflächen als Portlandzement. Die häufig im frisch ausgeschalten Zustand zu beobachtende typische, fleckenhafte Blauverfärbung verschwindet mit dem Austrocknen des Betons vollständig.

Wasser

Jedes Wasser aus öffentlichen Trinkwasserversorgungen ist zur Herstellung von Sichtbeton geeignet. Restwasser ist wegen des möglichen Einflusses auf die Farbe und andere Betoneigenschaften nicht zu verwenden (siehe Kap. 1.2).

Gesteinskörnung

Sichtbeton im Freien muss frost- und witterungsbeständig sein; dies bedeutet für die Gesteinskörnung, dass sie fest und frostbeständig sein muss. Die Farbe von Sichtbetonflächen wird nicht nur vom Zement, sondern auch von der Farbe des Feinkornanteils geprägt. Bei bearbeiteten Flächen gilt dies auch für das Grobkorn. Während der Ausführung eines Objekts darf daher die Herkunft der Gesteinskörnung nicht gewechselt werden.

Sichtbeton

Zusatzmittel

Betonverflüssiger (BV) bewirken bei unveränderter Wasserzugabe eine weichere Konsistenz und damit eine bessere Verarbeitbarkeit des Betons. Bei gleichbleibender Konsistenz besteht die Möglichkeit zur Senkung des Wasserzementwerts und damit zur Verbesserung vieler Betoneigenschaften (siehe Abb. 1.4.2). Zusatzmittel haben einen nur indirekten Einfluss auf die Farbe der Betonoberfläche. Zur Reduktion des Wasserzementwerts eingesetzte Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) können jedoch dunklere Oberflächen bewirken.

Betonzusatzstoffe

Als Zusatzstoffe von Sichtbeton werden hauptsächlich Steinmehl, Steinkohlenflugasche sowie Farbpigmente zur Einfärbung der Betonoberfläche verwendet.

Betonzusammensetzung

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, den Zementgehalt von Sichtbeton bei einem Größtkorn von 32 mm nicht unter 350 kg/m³ anzusetzen. Ein Einsatz von Steinkohlenflugasche oder Kalksteinmehl als Betonzusatzstoff kann sich als zweckmäßig erweisen.

Der Wasserzementwert ist bei jeder Mischung genau einzuhalten, da eine Abweichung von \pm 0,02 schon erkennbare Farbunterschiede bei glatten Sichtbetonoberflächen bewirkt. Der Wasserzementwert sollte so niedrig wie möglich gehalten werden.

Das Mehlkorn setzt sich zusammen aus dem Zement, dem in der Gesteinskörnung enthaltenen Kornanteil bis 0,125 mm und gegebenenfalls dem Betonzusatzstoff. Der Anteil darf die Werte in Abb. 1.3.28 nicht übersteigen. Die Kornzusammensetzung entspricht einer stetigen Kurve gemäß Abb. 1.3.17 und ist im oberen Bereich der Kurve anzusetzen. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Selbstverdichtendem Beton (siehe Kap. 2.12). Aufgrund der besonderen Materialeigenschaften dieses Betons lassen sich qualitativ hochwertige Sichtbetonflächen herstellen.





Abb. 2.16.2-4 phaeno, Science Center, Wolfsburg

Architekten: Zaha Mohammad Hadid, London

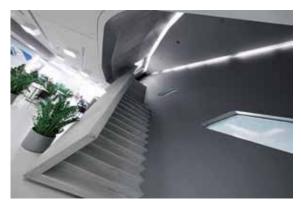




Abb. 2.16.5 DWI Astra-Turm Hamburg

Architekten: KSP Engel und Zimmermann, Braunschweig

Sichtbeton

Konsistenz

Eine geeignete Konsistenz ist bei der Herstellung von Sichtbeton eine wichtige Voraussetzung. Zum einen sollte der Beton weich genug sein, damit er sich beim Verdichten optimal entlüftet und somit lunkerfreie und möglichst porenarme Ansichtsflächen hergestellt werden können. Andererseits darf er nicht zu weich sein, um Entmischungserscheinungen zu vermeiden.

Dies führt in der Regel zu Konsistenzen der Ausbreitmaßklasse F2 bzw. F3.

Die fortschreitende Entwicklung im Bereich des Selbstverdichtenden Betons hat dazu geführt, dass auch sehr fließfähige und sedimentationsstabile Betone nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 hergestellt werden können. Diese sog. Leichtverdichtbaren Betone (LVB) sind Betone der Ausbreitmaßklasse F6 mit einem Ausbreitmaß ≥630 mm. Ähnlich wie Selbstverdichtender Beton bieten sie viele Vorteile beim Herstellen von Sichtbeton.

Unabhängig von der Ausbreitmaßklasse sollte der genaue Zielwert der Konsistenz an einer repräsentativen ren sollte dann höchstens ± 2 cm betragen, um zu starke Farbschwankungen und Unterschiede in den Materialeigenschaften zu vermeiden.

Musterfläche erprobt werden. Die Toleranz beim Betonie-

Abb. 2.16.6 Dokumentationsund Informationszentrum der Gedenkstätte Bergen-Belsen

Architekten: KSP Engel und Zimmermann, **Braunschweig**



Bauausführung

Es ist zu beachten, dass bei jeder Mischung ungeachtet der Schwankungen der Eigenfeuchte der Gesteinskörnung der gleiche Wasserzementwert eingehalten wird. Deshalb sollen Mischzeiten bei Sichtbeton möglichst gleichmäßig sein (mindestens 60 Sekunden). Das gleiche gilt für die Frischbetontemperatur, denn eine unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeit kann auch hier eine unterschiedliche Farbe verursachen.

Das Verdichten hat möglichst gleichmäßig und in kleinen Lagen zu erfolgen.

Beim Ausschalen des Sichtbetons ist darauf zu achten, dass alle Bauteile gleich lange eingeschalt waren (jeweils 2 bis 5 Tage). Die Bauteile sollten ohne Unterbrechung ausgeschalt werden. Ausgeschalte Flächen müssen freigehalten werden, um die Hydratation nicht zu beeinflussen.

Der Nachbehandlung ist im Hinblick auf den Sichtbeton besondere Beachtung zu schenken. Zement braucht zur vollständigen Hydratation Wasser. Wasser auf jungen Betonflächen verursacht aber eine Verfärbung durch Umwandlung des Calciumhydroxids in Calciumkarbonat. Dieses unlösliche Calciumkarbonat nennt man auch Ausblühungen bzw. Aussinterungen.

Da derartige Verfärbungen auf Sichtbeton unerwünscht sind, muss um die Sichtbetonflächen ein Feuchtraum geschaffen werden, in dem sich weder Luft bewegen noch Wasser ansammeln kann.

Ein so genannter Feuchtraum entsteht nach dem Ausschalen durch Vorhängen einer Folie in einem gewissen Abstand von der Betonfläche oder einem direkt auf die Betonfläche aufgebrachten Geotextil. Beim Vorhängen einer Folie muss darauf geachtet werden, dass die Folie den Beton nicht berührt und zwischen der Folie und dem Beton zudem keine Kaminwirkung entsteht.

Der Einfluss des Wetters bei der Herstellung des Sichtbetons ist allgemein größer, als üblicherweise angenommen wird. Die Hydratation des Zements ist ein chemischer Vorgang, der bei hohen Temperaturen schneller, bei niedrigen langsamer verläuft. Der Hydratationsgrad ist anderseits aber auch abhängig von der zur Verfügung stehenden Feuchtigkeit.

Eine Sichtbetonfläche bekommt daher bei kühler Witterung und starker Verdunstung eine andere Farbe als bei warmem, feuchtem Wetter. Da feuchtes Wetter aber auch einen Einfluss auf den Feuchtigkeitsgehalt der Schalhaut hat, macht sich dieser Einfluss in Farbunterschieden auf der Betonoberfläche bemerkbar. Es ist daher

Sichtbeton



Abb. 2.16.7 Dokumentationsund Informationszentrum der Gedenkstätte Bergen-Belsen

Architekten: KSP Engel und Zimmermann, Braunschweig

keinesfalls gleichgültig, welche Wetterverhältnisse bei der Sichtbetonherstellung herrschen.

Sichtbetonwände sollten nicht vor oder bei stärkeren Niederschlägen entschalt und nicht unmittelbar nach dem Ausschalen mit Wasser besprüht werden. Ebenfalls muss der Takt des Ausschalens so gewählt werden, dass der Beton immer gleich lange eingeschalt bleibt. Dies ist vor allem vor und nach den Wochenenden sowie bei Feiertagen zu beachten.



Abb. 2.16.8 Eingefärbter und farblos lasierter Sichtbeton



Abb. 2.16.9 Japangarten des Kunstmuseums Wolfsburg

Architekten: Prof. Kazuhisa Kawamura, Mainz

Sichtbeton

Sichtbeton- klasse		ton-	Beispiel	Anforderungen an geschalte Sichtbetonflächen nach Klassen bezüglich						Weitere Anforde- rungen		
				Textur	Pori	gkeit		ngleich- igkeit	Eben- heit	Arbeits-/ Schal-	Erpro- bungs-	Schal- haut-
				_	S ¹⁾	ns ²⁾	s ¹⁾	ns ²⁾	-	haut- fugen	fläche	klasse
	geringe	SB1	Betonflächen mit geringen gestalterischen Anforderungen, z.B.: Kellerwände oder Bereiche mit vorwiegend gewerbl. Nutzung	T1	F	21	FT1	FT1	E1	AF1	freige- stellt	SHK1
Anforderungen an Sichtbeton	normale	SB2	Betonflächen mit normalen gestalterischen Anforderungen, z.B.: Treppenhausräume, Stützwände	T2	P2	P1	FT2	FT2	E1	AF2	emp- fohlen	SHK2
Anforderung	ere	SB3	Betonflächen mit hohen gestalterischen Anforderungen, z.B.: Fassaden im Hochbau	T2	P3	P2	FT2	FT2	E2	AF3	dring. emp- fohlen	SHK2
besondere	SB4	Betonflächen mit besonders hoher gestalterischer Bedeutung, repräsentative Bauteile im Hochbau	Т3	P4	P3	FT3	FT2	E3	AF4	erfor- derlich	SHK3	

Abb. 2.16.10 Anforderungen an Sichtbetonklassen. Die Kosten wachsen mit den Anforderungen



Abb. 2.16.11 Sichtbeton in Wohnbauten



Abb. 2.16.12 Bürotrakt der Holcim Süddeutschland

Sichtbeton

Die Qualität der Betonoberflächen, insbesondere die Lunkerbildung, wird im Wesentlichen von zwei Parametern beeinflusst:

- Schalungshaut
- Trennmittelauftragsmenge.

Wahl der Schalungen

Die Schalungen spielen eine wichtige Rolle für das Gelingen eines Bauwerks. Sie verleihen der Betonoberfläche Form, Struktur und Farbe und geben dem Beton die maßgerechte Form. Oft wird den Schalungen nicht die nötige Beachtung geschenkt.

Die Wahl der Schalung erfolgt in der Regel durch das ausführende Bauunternehmen nach den folgenden Kriterien:

- Bauobjekt/Bauteil
- angestrebte Qualität der Betonoberfläche
- Anzahl der möglichen Wiederverwendungen
- Aufwand für die Erstellung
- Einbring- und Verdichtungsart des Betons
- Wärmeisolationsvermögen
- Preis.



Abb. 2.16.13
Versuche mit
unterschiedlichen
Schalungstypen,
Schalung und
Resultat.
Die eingetragenen
Nummern beziehen
sich auf
Abb. 2.16.14

Sichtbeton

Hinsichtlich des Saugverhaltens sind folgende grundsätzliche Unterschiede zu beachten:

- Saugende Schalhaut ermöglicht den Entzug von Luft und/oder Überschusswasser aus der Betonrandzone und fördert die Herstellung von Oberflächen mit wenigen Poren sowie einem relativ gleichmäßigen Farbton.
- Nicht saugende Schalhaut ermöglicht die Herstellung nahezu glatter Oberflächen. Sie begünstigt aber auch das Entstehen von Poren, Marmorierungen, Wolkenbildungen und Farbtonunterschieden (Abb. 2.16.13 und 2.16.14).

Weitere Anforderungen an die Schalung betreffen

- Maßgenauigkeit
- Dichtigkeit
- Steifigkeit, keine Deformationen
- Sauberkeit
- geringe Haftung am erhärteten Beton
- gefällige Oberflächenstruktur.

Abb. 2.16.14 Mögliche Einflüsse der Schalhaut auf Ansichtsflächen

Art b	ozw. Eigenschaften der Schalhaut	Merkmale der Betonoberfläche	Mögliche Auswirkungen
	Saugend		
1	Bretter, sägerau	Raue Brettstruktur (hohes Saug- vermögen), dunkel	Einzelne Holzfasern in der Betonober- fläche, Absanden unter Holzzuckerein- fluss, wenige Poren
2	Bretter, gehobelt	Glatte Brettstruktur (geringes Saugvermögen), deutlich heller als 1	Absanden unter Holzzuckereinfluss, stärkere Porenbildung als bei 1
3	Spanplatten, unbeschichtet	Leicht rau, dunkel	Starke Farbunterschiede (fleckig), wenige Poren
4	Drainvlies/Faservlies	Siebdruckstruktur, dunkler als 3	Gefahr der Faltenbildung, fast keine Poren
	Schwach saugend		
5	Dreischichtenplatten, oberflächenvergütet, Holzstruktur, die sich durch Strahlen verstärkt	Bei den ersten Einsätzen dunkel, bei weiteren Einsätzen heller	Poren (gehen mit zunehmender Einsatzhäufigkeit zurück)
6	Schalrohre aus Pappe	Glatt, hell	Kein Trennmittel erforderlich, nur für Stützen geeignet, sehr wenige Poren
	Nicht bzw. sehr schwach saugend		
7	Schaltafeln, oberflächenbehandelt, glatt oder nicht glatt	Glatt, hell	Farbtonunterschiede, Wolkenbildung, Marmorierung, verstärkte Poren- bildung
8	Finnenplatten, kunstharzbeschichtet	Siebdruckrasterstruktur, etwas dunkler als 7	Weniger ausgeprägte Auswirkungen als bei 7
9	Stahlblech	Glatt, hell	Wie 7, unter Umständen Rostflecken
10	Matrizen, filmbeschichtet	Je nach Matrize glatt bis stark strukturiert, hell	Starker Einfluss von Undichtigkeiten an Fugen, verstärkte Porenbildung
11	Schalrohre aus Metall oder Kunststoff	Glatt, hell	Wie 7, verstärkte Marmorierung

Sichtbeton

Trennmittel

Trennmittel werden verwendet, um die Schalungselemente einwandfrei von der Betonoberfläche lösen zu können und gleichzeitig das Schalungsmaterial zu schützen und zu konservieren. Sie sind dünn, mit hohem konstantem Druck (Vernebelung), gleichmäßig sowie grundsätzlich vor dem Einbau der Bewehrung aufzutragen. Überschüssiges Trennmittel ist mit einem Lappen abzuwischen.

Trennmittel können bei Überdosierungen zu Fleckenbildung sowie zur Abmehlung oder Absandung der Betonoberflächen führen.

Fleckenbildung sowie unterschiedliche Grautönungen auf Betonoberflächen sind häufig auf unsachgemäßes Auftragen des Trennmittels zurückzuführen (Abb. 2.16.15).

Wirkungsweise der Trennmittel

Hydrophobe (wasserabweisende) Trennmittel verhindern eine frühzeitige Zementleimhaftung auf den Schalungsoberflächen. Damit ermöglichen sie, dass beim Verdichtungsprozess Luftblasen an die Schalhaut gelangen.

Hydrophile (wasseranziehende) Trennmittel begünstigen die Zementleimhaftung auf den Schalungsoberflächen und verhindern damit, dass die Luftblasen beim Verdichtungsprozess an die Schalhaut gelangen können.

Weitere Parameter

Bezüglich der Qualität der Betonoberfläche werden in der Praxis immer wieder die folgenden Einflussfaktoren genannt:

- Größtkorn
- Schalungsbelag
- Trennmittelart
- Zusatzmittel
- Zusatzstoff
- Zementart.



Abb. 2.16.15 Flecken durch Trennmittelüberdosierung

Beton für Industrieböden

Industrieböden aus Beton werden vielfältig beansprucht. Für die dauerhafte Funktionalität eines Industriebodens müssen alle Anforderungen berücksichtigt werden. Diese ergeben sich aus der geplanten Nutzung sowie aus der Lage des Industriebodens. Beispielsweise sind die Anforderungen an einen Industrieboden in einer Produktionshalle andere als für einen Boden im Freien, der als Lagerund Ladefläche für Schüttgüter genutzt werden soll.

Wesentlich für alle Industrieböden ist, dass sie im Grunde aus drei Teilen bestehen; einem gleichmäßigen und verdichteten Untergrund, einer Tragschicht aus Kies, Schotter oder einer Bodenverfestigung sowie einer abschließenden Betonplatte mit bearbeiteter Oberfläche. In diesem Kapitel wird ausschließlich die Planung und Ausführung der Betonplatte betrachtet und zusammenfassend als Industrieboden bezeichnet.

Ein Industrieboden ist kein Bauteil im Sinne der DIN 1045, wenn er auf einer durchgehenden Tragschicht aufliegt und keine anderen Bauteile trägt und diese auch nicht aussteift. Dies ist der Regelfall. Gleichwohl ist es empfehlenswert, das Normenwerk sinngemäß anzuwenden.

Planung und Vorbereitung

Wichtiger Teil der Planung ist die vollständige Erfassung der wirkenden Beanspruchungen sowie die Berücksichtigung der Nutzungseigenschaften, die sich aus dem späteren Gebrauch des Industriebodens ergeben.

Auf dieser Grundlage ist eine geeignete Konstruktion inklusive Fugenplan zu erstellen sowie die benötigte Betonqualität zu wählen. Zur reibungslosen und qualitätsgerechten Ausführung muss ein detailliertes Betonierkonzept erstellt werden. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Einbauleistung, die Oberflächenbearbeitung, die Zwischennachbehandlung und die Nachbehandlung zu berücksichtigen. Alle geforderten Betoneigenschaften sollten mit dem zuständigen Betontechnologen abgestimmt werden.

Betoneigenschaften

Ein Beton für Industrieböden sollte über einen ausreichenden Mehlkorngehalt 0/0,125 mm zwischen 360 kg/m³ und 370 kg/m³ verfügen. Der äquivalente Wasserzementwert sollte zwischen 0,47 und 0,53 liegen. Es ist zu beachten, dass bei einem Wasserzementwert von unter 0,45 eine

	schreibung der ngebungsbedingung	Exposi- tions- klassen	druckfestig-	Beton- deckung c _{nom} [mm] (d ≤ 20 mm)
.	Halle, geschlossen, kein Frost	X0	C8/10 (nicht maßgebend)	-
unbewehrt	im Freien, überdacht, Frost, kein Taumittel	XF1	C25/30	_
n	Freifläche, direkt bewittert, Frost-Taumittel	XF4	C30/37 LP	-
	Halle, geschlossen, kein Frost, bewehrt	XC1, XC2	C16/20 (nicht maßgebend)	35
bewehrt	im Freien, überdacht, Frost, kein Taumittel, bewehrt	XC3, XF1	C25/30	35
	Freifläche, direkt bewittert, Frost-Taumittel, bewehrt			55

Abb. 2.17.1

Dauerhaftigkeitsfestlegungen allein aufgrund der Umgebungsbedingungen gemäß Zement-Merkblatt T1: Industrieböden aus Beton (2006-01)

Einflussgrößen für Industrieböden

Belastung

- Punktförmig wirkende Lasten
- Flächig wirkende Lasten
- Dynamische Belastungen

Physikalische Beanspruchungen

- Temperaturdifferenzen
- Austrocknung
- Schleifende, rollende, stoßende Beanspruchung

Chemische Beanspruchung

- Säuren, Sulfate, Laugen
- Öle, Fette

Besondere Eigenschaften

- Wärmeleitwiderstand
- Flüssigkeitsdichtheit
- Elektrische Ableitfähigkeit
- Feuerwiderstand

Nutzungseigenschaften

- Nutzungsbeginn
- Ebenheit
- Rutschsicherheit
- Staubfreiheit
- Reinigungsfähigkeit
- Instandsetzungsfähigkeit
- Dauerhaftigkeit

Beton für Industrieböden

Hartstoffeinstreuung nicht zielsicher ausführbar ist. Aufgrund des niedrigen Wassergehaltes kann der zusätzlich aufgebrachte Zementanteil nicht ausreichend mit Wasser benetzt werden. Ein nachträgliches Aufsprühen von Wasser ist unzulässig. Das Aufbringen eines Industrieestrichs oder aber die Ausführung einer Hartstoffschicht mit nachträglichem Verbund ist in jedem Fall vorzuziehen.

Kombinationen von Luftporenbetonen und frisch aufgebrachten Hartstoffeinstreuungen bzw. Hartstoffschichten sollten wegen möglichen Verbundstörungen zwischen Beton und Hartstoffschicht vermieden werden. Weiterhin kann es aufgrund des Flügelglättens zu einer Zerstörung des Luftporensystems in der obersten Schicht kommen. Daher ist die Kombination der Expositionsklasse XF4 und XM3 technisch nicht ausführbar.

Zur Herstellung qualitativ hochwertiger Industrieböden sollte eine Einbaukonsistenz im Bereich F3 angestrebt werden.



Abb. 2.17.3 Prüfung der Frischbetoneigenschaften

Klassen- bezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)	Mindestdruckfestigkeit min f _{ck}	Anforderu an die Bet	ngen onzusammensetzung
XM1 1)	mäßige	tragende oder aussteifende	C30/37	C30/37:	
	Verschleiß-	Industrieböden mit Beanspruchung		max w/z	
	beanspruchung	durch luftbereifte Fahrzeuge	C25/30 LP möglich,		300 kg/m³
			wenn gleichzeitig XF		360 kg/m ³
				Mehlkorn	≤ 450 kg/m³ (bei max z)
XM2 ¹⁾	starke	tragende oder aussteifende	C35/45	C30/37:	+ Oberflächenbehandlung
	Verschleiß- beanspruchung	Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummibereifte Gabelstapler	•	max w/z	O
			C30/37 LP möglich,	min z	300 kg/m ³
			wenn gleichzeitig XF	max z	360 kg/m ³
			C30/37 möglich,	C35/45:	
			wenn Oberflächenbehandlung	max w/z	0,45
			0		320 kg/m ³
					360 kg/m ³
				Mehlkorn	≤ 450 kg/m³ (bei max z)
KM3 ¹⁾	sehr starke	tragende oder aussteifende	C35/45	C35/45·	+ Hartstoffe
	Verschleiß-	Industrieböden mit Beanspruchung	Hartstoffe nach DIN 1100	max w/z	
	beanspruchung	durch elastomer- oder			320 kg/m ³
	8	stahlrollenbereifte Gabelstapler, mit	C30/37 LP möglich,		360 kg/m ³
		Kettenfahrzeugen häufig befahrene Oberflächen	wenn gleichzeitig XF Hartstoffe nach DIN 1100		≤ 450 kg/m³ (bei max z)

¹⁾ Anforderungen an Gesteinskörnungen nach DIN Fachbericht 100, Kapitel 5.5.5: mäßig raue Oberfläche, gedrungene Gestalt, Korngemisch möglichst grobkörnig

Abb. 2.17.2

Verschleißklassen nach DIN EN 206-1/DIN 1045 für tragende und aussteifende Industrieböden gemäß Zement-Merkblatt T1: Industrieböden aus Beton (2006-1)

Beton für Industrieböden

Stahlfaserbeton

Die Verwendung von Stahlfaserbeton bietet im Bereich der Industrieböden eine Reihe von Vorteilen. Stahlfaserbeton besitzt eine erhöhte Schlagzähigkeit, ein verbessertes Dauerschwingverhalten sowie einen erhöhten Verschleißwiderstand. Weiterhin sind Bauteile aus Stahlfaserbeton bis in die Randzone bewehrt. Zum einen schützt dies Bauteilkanten und -ecken – z.B. an den Fugenflanken – vor Beschädigungen durch Schlag. Zum anderen führt die positive Beeinflussung der Rissneigung in der Randzone zu einem dichteren Betongefüge. Dadurch kann die Dauerhaftigkeit des Industriebodens gesteigert werden. Eigenschaftsorientierter Stahlfaserbeton nach Faserbetonklassen kann in Kombination mit schlaffer Bewehrung rechnerisch zur Rissbreitenbeschränkung angesetzt werden. Auch ein Nachweis der Tragfähigkeit ist möglich. Wie für alle Stahlfaserbetonanwendungen wird eine statische Bemessung des Bauteiles dringend empfohlen.

Abb. 2.17.4 Stahlfaserbeton für Industrieböden



Betoneinbau

Das Betonieren sollte bei Temperaturen zwischen 5°C und 30°C erfolgen. Bei niedrigeren oder höheren Temperaturen sind weitere Maßnahmen – wie das Wärmen oder Kühlen des Frischbetons sowie eine besondere Nachbehandlung – erforderlich. Idealer Weise ist der Industrieboden in die vorher erstellte, bereits geschlossene Halle einzubauen.

Der Beton wird entweder in Streifen bzw. Feldern zwischen Seitenschalungen oder großflächig mit Hilfe von Lehren oder Spezialgeräten eingebaut.

Richtwerte für durchschnittliche Einbauleistungen gibt Abb. 2.17.5

Plattenstärke	Einbauleistung
20 cm	35 m³/Stunde
25 cm	40 m³/Stunde
30 cm	50 m³/Stunde

Δbb. 2.17.5

Richtwerte für durchschnittliche Einbauleistungen

Bei Fließmitteldosierungen in den Fahrmischer auf der Baustelle ist auf eine ausreichend lange Mischzeit zu achten. Diese sollte je Kubikmeter Beton eine Minute, mindestens jedoch 5 Minuten, betragen.

Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis werden bereits im Transportbeton dosiert und optimal untergemischt. Eine nachträgliche planmäßige Fließmittelzugabe auf der Baustelle entfällt.

Der Betoneinbau sollte kontinuierlich erfolgen. Lange Transport- und Liegezeiten des Betons sind zu vermeiden. Der Beton muss zügig entladen, verarbeitet und verdichtet werden. Bei unterschiedlich raschem Betonierfortschritt kommt es in der Regel zu Problemen bei der anschließenden Oberflächenbearbeitung, da der optimale Zeitpunkt des Abscheibens und Glättens nicht eindeutig gewählt werden kann. Das Betonlieferwerk ist über lange Standzeiten oder sonstige Verzögerungen umgehend zu informieren.

Beton für Industrieböden

Oberflächenbearbeitung

Zur nachträglichen Oberflächenbearbeitung wird in der Regel das Tellern sowie das anschließende Flügelglätten der Betonoberfläche durchgeführt.

Zwischen Betoneinbau und Glättbeginn sind Maßnahmen gegen das vorzeitige Austrocknen der Betonoberfläche zu ergreifen. Es empfiehlt sich das Auflegen einer PE-Folie. Das Besprühen der Oberfläche mit Wasser ist nicht zulässig.

Der Glättbeginn muss in Abhängigkeit der Witterungsverhältnisse festgelegt werden. Wird ein Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis verwendet, kann sich der Glättbeginn verzögern. Eine enge Abstimmung zwischen bauausführender Firma sowie dem Betonlieferanten wird empfohlen.

Bei Hartstoffeinstreuungen und frisch in frisch eingebaute Hartstoffschichten sind nach dem Aufbringen mit dem Tellerglätter und anschließend mit dem Flügelglätter einzuarbeiten. Die üblichen Hartstoffmengen liegen zwischen 3 kg/m² und 5 kg/m². In jedem Fall sind die Angaben des Hartstoffherstellers zu befolgen.

Durch das Tellern wird der Hartstoff in den Beton eingearbeitet und in einem ersten Schritt geglättet. Größere Unebenheiten können jedoch nicht ausgeglichen werden. Das folgende Flügelglätten muss solange durchgeführt werden, bis eine kellenglatte Oberfläche entsteht. Ein Aufbringen von Wasser während der Arbeiten beeinträchtigt die Oberflächenqualität und darf daher nicht erfolgen.





Abb. 2.17.6-7 Oberflächenbearbeitung eines Industriebodens durch Flügelglätten

Beton für Industrieböden

Abb. 2.17.9 Mindestdauer der Nachbehandlung von Beton bei den Expositionsklassen nach DIN 1045-2 außer X0, XC1 und XM

Nr.	1	2	3	4	5
	Oberflächentemperatur	Mind	lestdauer der Nach	behandlung in Tage	en ¹⁾
	ϑ in °C ⁵⁾		Festigkeitsentwick	lung des Betons 3)	
			$r=f_{cm2}/$	f _{cm28} ⁴⁾	
	_	r ≥ 0,50	r ≥ 0,30	r ≥ 0,15	r < 0,15
1	⊕≥25	1	2	2	3
2	25 > ϑ ≥ 15	1	2	4	5
3	15 > ϑ ≥ 10	2	4	7	10
4	10 > ϑ ≥ 5 ²)	3	6	10	15

- 1) Bei mehr als 5 Stunden Verarbeitbarkeitszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.
- ²⁾ Bei Temperaturen unter 5°C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeit zu verlängern, während der die Temperatur unter 5°C lag.
- ³⁾ Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird durch das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeiten nach 2 Tagen und nach 28 Tagen (ermittelt nach DIN 1048-5) beschrieben, das bei der Eignungsprüfung oder auf der Grundlage eines bekannten Verhältnisses von Beton vergleichbarer Zusammensetzung (d.h. gleicher Zement, gleicher w/z-Wert) ermittelt wurde.
- ⁴⁾ Zwischenwerte dürfen eingeschaltet werden.
- 5) Anstelle der Oberflächentemperatur des Betons darf die Lufttemperatur angesetzt werden.



Abb. 2.17.8 Nachbehandlung durch Abdecken mit einer Folie

Nachbehandlung

Die Nachbehandlung hat unmittelbar nach Abschluss des Verdichtens oder der Oberflächenbearbeitung zu erfolgen. Die Mindestdauer ist der Abb. 2.7.6 zu entnehmen.

Die Nachbehandlungsverfahren müssen sicherstellen, dass ein übermäßiges Verdunsten von Wasser über die Betonoberfläche verhindert wird.

Durch die Nachbehandlung soll das Frühschwinden gering gehalten, eine ausreichende Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Betonrandzone sichergestellt, das Gefrieren verhindert und schädliche Erschütterungen, Stoß oder Beschädigung vermieden werden.

Für Betonflächen, die einem Verschleiß entsprechend den Expositionsklassen XM ausgesetzt sind, sind die Werte für die Mindestdauer der Nachbehandlung ohne genauen Nachweis zu verdoppeln.

Spritzbeton

Spritzbeton als Betonierverfahren

Spritzbeton wird nach der Art seiner Verarbeitung bezeichnet. Wie der Name sagt, wird er in einem geschlossenen überdruckfesten Schlauch und/oder einer Rohrleitung zur Einbaustelle gefördert und dort durch Spritzen aufgebracht. Durch die Wucht des Aufpralls verdichtet sich dabei der Beton. Im Gegensatz zu Rüttelbetonen, die eingebracht und erst anschließend verdichtet werden, erfolgt beim Spritzbeton beides gleichzeitig. Beim Auftreffen an der Auftragsfläche prallt ein Teil des Spritzguts, das Rückprallgut, zurück.

Grundsätzlich wird zwischen dem Trocken- und dem Nassspritzverfahren unterschieden. Die Verfahren unterscheiden sich in der Zusammensetzung der Ausgangsmischung und den Spritzbetonmaschinen. Beim Trockenspritzverfahren wird ein so genanntes Trockengemisch gefördert, dem erst an der Spritzdüse das Zugabewasser mit oder ohne Beschleuniger zugegeben wird. Beim Nassspritzverfahren ist das Zugabewasser bereits im Ausgangsgemisch des Spritzguts enthalten.

Zur Erzeugung des nötigen Aufpralldrucks wird dem Spritzgut an der Düse Druckluft zugeführt. Weitere Details zu den unterschiedlichen Verfahren sind in Abb. 2.18.1 aufgeführt. In diesem Zusammenhang wird auf die DIN EN 14487-2 hingewiesen.

Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Spritzbetonsysteme und -verfahren

Die Größe des Bauvorhabens und die örtlichen Randbedingungen beeinflussen die Wahl der Spritzbetonsysteme. Kleinere Spritzbetonetappen werden in der Regel im Trockenspritzverfahren ausgeführt, das bei beengten Platzverhältnissen Vorteile bietet. Das Nassspritzverfahren gelangt aus wirtschaftlichen Überlegungen erst bei größeren Mengen zur Anwendung (Abb. 2.18.2).

Spritzbeton als Baustoff

Spritzbeton ist in aller Regel Normalbeton, der mit den Ausgangsstoffen Zement, Sand/Kies, Wasser, Erstarrungsbeschleuniger und bei Bedarf Zusatzmitteln und Zusatzstoffen hergestellt wird. Weiterführende Regelungen sind aus DIN EN 14487-1 ersichtlich.

Verfahren	Trocken	spritzen	Nassspritzen	
System-Nummer	1	2	3	4
Wassergehalt der Gesteinskörnung	< 5 Ma	ssen-%	ofentrocken	keine Anforderung
Korngröße	8 (max.	16) mm	4 (max. 8) mm	8 (max. 16) mm
Bindemittel	Zement nach DIN EN 197-1	Spritzbindemittel (SBM) nach der österreichischen Spritzbetonrichtlinie		Zement nach DIN EN 197-1
Zementgehalt	ca. 350 kg/m³	ca. 330	kg/m³	ca. 425 kg/m³
Erstarrungsbeginn ohne Beschleuniger	> 120 Minuten	< 3 Minuten		> 120 Minuten
Beschleuniger getrennt beigegeben?	ја	nein		ja
Herstellungsort des Spritzguts	Transportbeton oder vor Ort	vor Ort		Transportbeton oder vor Ort
Fördergerät/System	Ro	tor	Rotor oder Dosierblasschnecke	Betonpumpe
Wassergehalt des Spritzguts	< 4 Massen-	%, erdfeucht	ofentrocken	nass
Förderart	Dünnstrom		Dichtstrom	

Abb. 2.18.1 Übersicht über die verschiedenen Spritzbetonsysteme

Vom Frischbeton zum Festbeton

Spritzbeton

Abb. 2.18.2 Einsatzgebiete von Spritzbeton und Eignung der Verfahren

Verfahren		trocken		nass
System-Nummer	1	2	3	4
Untertagebau, Vortriebssicherung im Fels (Ausbruchssicherung)	+	+	-	++
Untertagebau, Vortriebssicherung im Lockergestein (Ausbruchssicherung)	++	+	++	-
Untertagebau, einschaliger Ausbau	+	+	-	++
Untertagebau, Abdichten von Wassereinbrüchen	+	++	++	-
Untertagebau, Ausgleich und Tragschicht für Abdichtungen	+	+	-	++
Versiegelung der Felsoberfläche als Verwitterungsschutz		-	+	+
Baugrubensicherung		-	+	+
Instandsetzung und Verstärkung von Betonbauten		+	++	-
Bauwerke (Schalen, Kuppeln, Schwimmbassins, Spritzbetonhäuser)		+	+	_
Künstliche Felsen, Rollbrettbahnen, Rodel- und Bobpisten usw.	++	+	+	_

Die Eigenschaften des Spritzbetons sind bezüglich Rohdichte, Druck-, Zug- und Scherfestigkeit etwa vergleichbar mit jenen von Normalbeton. Dank seines besonderen Gefügeaufbaus ist Spritzbeton aber in der Regel dichter und frostbeständiger als üblicher Beton gleicher Zusammensetzung. Auch seine hervorragende Haftung auf der Auftragsfläche und die beliebige Oberflächengestaltung zeichnen Spritzbeton aus. Je nach Anforderungen kann er mit Bewehrungsnetzen mit oder ohne Rückverankerung durch Anker und Dübel zusätzlich gesichert werden.

Dank der einfachen Handhabung gewinnt der alternative Einsatz von Stahlfasern im Spritzbeton für verschiedene Anwendungen an Bedeutung. Beispiele für Spritzbetonzusammensetzungen zeigt Abb. 2.18.4.



Abb. 2.18.3 Trockenspritzen: Baugrubensicherung

Spritzbetonrezeptur	Trockenspritzen	Nassspritzen
Druckfestigkeitsklasse	C 25/30	C 35/45
Expositionsklasse	XC3	XC3, XA2
Größtkorn D _{max}	8 mm	8 mm
Chloridgehaltsklasse	CI 0,40	CI 0,40
Konsistenzklasse	C0	F4
Zusätzliche Anforderungen:		
Verarbeitungszeit	3 Std.	6 Std.
Frühfestigkeit nach 4 Std.		4 MPa
Frühfestigkeit nach 12 Std.	10 MPa	
Zementgehalt	350 kg/m ³	425 kg/m³
Zusatzstoffe (Silicastaub)		25 kg/m³
Gesteinskörnung	1650 kg/m ³	
Sand 0–4 mm	60 M%	55 M%
Kies 4–8 mm	40 M%	45 M%
Fließmittel (FM)	nein	1,0 M% v. Z.
Verzögerer (VZ)	0,2 M% v. Z.	0,4 M% v.Z.
Beschleuniger (BE)	4,0 M% v. Z.	5,0 M% v.Z.

Für die Stoffraumrechnung gilt bei:

- Trockenspritzen: Zementgehalt in kg pro 1000 Liter lose geschüttete Gesteinskörnung.
- Nassspritzen: Die Einwaage aller Betonkomponenten, fertig verdichtet, ergibt 1 $\rm m^3$ fertigen Beton.

Abb. 2.18.4

Mögliche Spritzbetonrezepturen für das Trocken- und das Nassspritzverfahren

Vom Frischbeton zum Festbeton

Spritzbeton

Anwendung

Spritzbeton wird für die Ausführung von bewehrten und unbewehrten Bauteilen verwendet. Der anteilig häufigste Einsatz erfolgt im Untertagebau für Sicherungsarbeiten bzw. für den Ausbau. Aber auch zur Auskleidung von Becken und Kanälen, zur Sicherung von Hängen, Böschungen und Baugruben (Abb. 2.18.3 und 2.18.5) oder zur Instandsetzung schadhafter Bauwerke aus Beton und Mauerwerk gelangt Spritzbeton zur Anwendung.

Einen Aufschwung erfuhr die Spritzbetontechnik durch den Einsatz schnell erhärtender Spritzbetone zur Sofortsicherung im Untertagebau sowie durch die immer weiter fortschreitende Entwicklung der Applikationstechnik. Abb. 2.18.7 und 2.18.8 zeigen Spritzbetonroboter im Einsatz.

Keine andere Verarbeitungstechnologie erfordert so umfangreiche Kenntnisse und praktische Erfahrung wie der Spritzbeton. Besonders die Wasserdosierung, die Druckluftförderung und Applikation beeinflussen die Qualität und Effektivität des Spritzbetons erheblich. Die Ausführung von Spritzbetonarbeiten ist deshalb im Allgemeinen Spezialfirmen mit den notwendigen Fachkräften und Maschinen vorbehalten.



Abb. 2.18.5 Sicherung einer Baugrube mit Spritzbeton



Abb. 2.18.6 Sicherung des Gebirges mit Spritzbeton



Abb. 2.18.7 Aufbringen von Spritzbeton mit einem Spritzbetonroboter



Abb. 2.18.8 Gestalten mit Spritzbeton: Künstlicher Fels in einem Tiergehege

Entmischung des Betons

Entmischungserscheinungen

Beim Transport, Fördern, Einbringen und Verdichten können verschiedenartige Entmischungen auftreten, die die Betonqualität und/oder das Aussehen mehr oder weniger beeinträchtigen. Man unterscheidet folgende Entmischungen:

- zwischen verschiedenen Korngrößen der Gesteinskörnung
- zwischen Gesteinskörnung und Zementleim
- zwischen Mehlkornanteil und Wasser. In der Praxis können diese Entmischungsarten nicht eindeutig unterschieden werden.

Die wichtigsten Erscheinungsformen der Entmischung sind:

- Kiesnester als Anreicherungen von grober Gesteinskörnung im Beton (Abb. 3.1.1)
- Wasserschlieren, d.h. lokale Anreicherungen von überschüssigem Wasser mit feinen Zement- und Gesteinskörnungsbestandteilen an senkrechten Schalungen (Abb. 3.1.2)
- Bluten: überschüssiges Anmachwasser sammelt sich auf der Betonoberfläche an. Die Folgen sind unregelmäßige, abgesandete, poröse Oberflächen
- Mikroentmischungen, das Entmischen von Zement und Feinsand, unter denen das optische Erscheinungsbild der Betonoberfläche leidet (Abb. 3.1.3).

Ursachen und Maßnahmen

Die wichtigsten Ursachen von Betonentmischungen, aus denen sich auch bereits die Abhilfemaßnahmen ableiten lassen, sind:

- undichte Schalungen, sodass Zementleim aus der Schalung austreten kann (Siebwirkung)
- zu dichte Bewehrung (Siebwirkung)
- ungenügende Überdeckung der Bewehrung
- ungeeignete Betonzusammensetzung (schlecht abgestimmte Kornzusammensetzung, zu geringe Zementdosierung, zu weiche Konsistenz des Frischbetons, übermäßige Dosierung eines Fließmittels)
- für die Bauteildimensionen zu großes Größtkorn
- zu kurze Mischzeit



Abb. 3.1.1
Kiesnester durch
Entmischung als
Folge zu hoher
Fallhöhe und/
oder zu dichter
Bewehrung



Abb. 3.1.2 Auswirkung von Wasserschlieren auf Aussehen der Betonoberfläche



Abb. 3.1.3
Unansehnliche Betonoberfläche als Folge einer Mikroentmischung, d.h. Entmischung des Zementmörtels in Zement und Feinsand

Beton ist ein relativ sprödes Material. Verglichen mit seiner Druckfestigkeit weist der Beton eine sehr geringe Zugfestigkeit auf, weshalb die Normen aus Vorsichtsgründen in den meisten Fällen von den Ingenieuren verlangen, die Zugfestigkeit bei der Dimensionierung nicht einzurechnen. Überschreiten die Zugbeanspruchungen die Betonzugfestigkeit, treten unvermeidlich Risse auf. Hohe Zugbeanspruchungen und das sich daraus ergebende Rissrisiko können einen oder mehrere der folgenden Gründe haben:

- zu rasche Austrocknung des Betons, z.B. fehlende Nachbehandlung
- Temperaturspannungen, z.B. aus Hydratationswärme
- Temperaturänderungen
- Lasteinwirkungen, z.B. Eigengewicht, Gebrauchslast aus Verkehr
- aufgezwungene oder behinderte Verformung, z.B. Setzungen, Schwinden
- Frosteinwirkung
- chemische Reaktionen, z.B. Bewehrungskorrosion, Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

3.00

Diese Risse sind z.T. schwer vermeidbar, stellen jedoch selten eine Gefahr für die Sicherheit des Bauwerks dar, solange sie dank geeigneter Maßnahmen ein annehmbares Maß nicht überschreiten.

Neben dem ästhetischen Schaden, den Betonoberflächen durch Risse erleiden, können sich auftretende Risse auch nachteilig auf die Dauerhaftigkeit des Bauwerks auswirken, falls sie das Eindringen aggressiver Substanzen ermöglichen, die den Beton und die Bewehrung zersetzen (Abb. 3.2.1). Dies ist im Allgemeinen dann der Fall, wenn die Rissbreiten 0,3 bis 0,4 mm überschreiten oder wenn es sich um durchgehende Risse handelt. In letzterem Fall, und wenn ein Beton hoher Dichtigkeit gefordert ist, wird deshalb eine Beschränkung der Rissbreiten auf maximal 0,1 bis 0,2 mm empfohlen.

Gewisse Maßnahmen erlauben es, das Rissrisiko und die Rissbreiten stark zu reduzieren oder in bestimmten Fällen ganz zu verhindern. Um dies zu erreichen, sind in Abhängigkeit der Rissursache Maßnahmen in den folgenden Bereichen erforderlich:

- Entwurf, Bemessung und konstruktive Durchbildung des Bauwerks
- Zusammensetzung, Verarbeitung und Nachbehandlung des Betons
- Bau- und Betonieretappen.

Entwurf, Bemessung und konstruktive Durchbildung des Bauwerks

Die Wahl des statischen Systems sowie Anzahl und Lage der Fugen beeinflussen die Größe der lastunabhängigen Zugspannungen aus behinderten Zwangsverformungen (z.B. infolge Schwindens) im Beton stark. Sobald diese Spannungen die Zugfestigkeit des Betons überschreiten, treten unausweichlich Risse auf. Nur eine Vorspannung kann die Rissbildung verhindern, weil die Druckspannungen, die sie im Beton aufbaut, die Zugspannungen vermindern und damit der Rissbildung entgegenwirken. Schlaff bewehrter Beton muss reißen, damit die Bewehrung aktiviert werden kann. Je nach Anforderungen an das Bauteil (z.B. Wasserundurchlässigkeit, Chloridangriff, ect.) sollten die Rissbreiten möglichst gering gehalten werden. So wird die Gebrauchstauglichkeit einer Konstruktion dauerhaft sichergestellt. Eine solche Rissbreitenbeschränkung muss immer durch eine Bemessung erfolgen.

Risse im Beton können aber auch die Folge konstruktiver Mängel sein, hervorgerufen durch unzureichendes Tragvermögen der Konstruktion, mangelhafte Auslegen und Einbringen der Bewehrung, fehlende oder mangelhafte Anordnung von Fugen, Auftreten von Zwangsspannungen als Folge unzweckmäßiger Auflagerung von Balken und Platten, durch ungeeignete Kombination verschiedener Baustoffe oder Setzungserscheinungen bei ungenügender Gründung sowie durch Bewegungen des Untergrunds.



Zusammensetzung und Nachbehandlung des Betons

Betonzusammensetzung und Nachbehandlungsmaßnahmen üben den gewichtigsten Einfluss auf die Größe der Schwindverformungen und damit auf das Schwindrissrisiko aus. Auf Seite 114 ff. werden die verschiedenen Schwindarten und die zugehörigen Vermeidungsmaßnahmen detailliert behandelt.

5	4	6	5	6
2	7	3	3	4
8	1	9	1	2
a)			b)	

Abb. 3.2.2
Wahl der Betonierabschnitte bei einer
Bodenplatte (Grundriss)
a) Ungünstige Lösung: erhöhtes Rissrisiko

b) Günstige Lösung: geringes Rissrisiko

Bau- und Betonierabschnitte

Auch mit dem Festlegen von Arbeitsfugen und Betonierabschnitten lässt sich bis zu einem gewissen Maß das Rissrisiko steuern. Hier empfiehlt es sich, die Anzahl der einzelnen Bauabschnitte und damit auch die unterschiedlichen Betonalter möglichst gering zu halten, um den schädlichen Wirkungen des differenziellen Schwindens zwischen den einzelnen Bauabschnitten zu begegnen (Abb. 3.2.2 und 3.2.3).

Auch das Anordnen von Schwindgassen bei größeren Bauteilen kann das Rissrisiko erheblich reduzieren (Abb. 3.2.4).

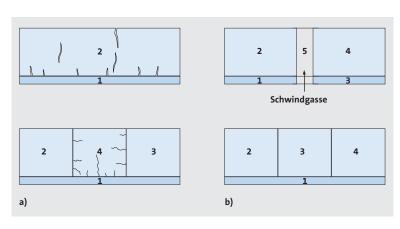


Abb. 3.2.3
Wahl der Betonierabschnitte bei einer Stützmauer (Längsansicht)
a) Ungünstige Lösung: erhöhtes Rissrisiko
b) Günstige Lösung: geringes Rissrisiko



Abb. 3.2.4 Schwindgasse bei einem großen Gebäude

Ursachen und Vermeidung von Betonschäden

Rissbildung und Schwinden

Schwindarten

Es ist wichtig, zwischen den verschiedenen Arten des Schwindens zu unterscheiden, um geeignete Vermeidungsmaßnahmen ergreifen zu können (Abb. 3.2.5).

Abb. 3.2.5 Rissrisiko in Abhängigkeit der Schwindart

Schwindart	Ris	sgefahr		Nützlichkeit/Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen		
	Zeitpunkt des Auftretens	Rissart	Betonzusam- mensetzung	Nach- behandlung	Bewehrung	
Plastisches Schwinden ¹⁾ (auch Früh- oder Kapillarschwinden)	vor oder während des Erhärtens	oberflächlich	gering	sehr hoch	-	
Thermisches Schwinden	10 Std. bis eine Woche nach dem Betonieren	oberflächlich bis durchgehend	hoch	sehr hoch	mäßig	
Trocknungs- schwinden ²⁾						
 kurzfristig im Falle ungenügender Nachbehandlung 	einige Tage bis Wochen nach dem Betonieren	oberflächlich bis durchgehend	sehr hoch	sehr hoch	mäßig	
 langfristig im Falle korrekter Nachbehandlung- 	einige Monate bis Jahre nach dem Betonieren	durchgehend	hoch	sehr hoch	hoch	

¹⁾ Verdunsten von Wasser in noch weichem Zustand des Betons

²⁾ Verdunsten von Wasser in erhärtetem Zustand des Betons

Plastisches Schwinden

Risse infolge plastischen Schwindens (so genannt, weil es vor dem Hydratationsende erfolgt – man spricht auch von Früh- oder Kapillarschwinden) entstehen durch raschen Wasserverlust unmittelbar nach dem Einbringen des Betons. Dieser kann die Folge übermäßiger Wasserverdunstung, aber auch übermäßiger Wasseradsorption der Schalungen oder des Bodens sein. Der Wasserverlust bewirkt ein Schwinden des Betons in denjenigen Schichten, die ihm besonders ausgesetzt sind. Die vom Wasserverlust nicht betroffenen Schichten schwinden kaum (Abb. 2.17.10). Dadurch werden im Betoninneren Zugspannungen hervorgerufen, die bei Überschreiten der naturbedingt anfänglich sehr niedrigen Zugfestigkeit zu Rissen mit mehr als 1 mm Breite führen können. Horizontale Bauteile wie Bodenplatten, Decken und Estriche sind am stärksten vom plastischen Schwinden betroffen (Abb. 3.2.6 und 3.2.7).

Das plastische Schwindrisiko ist umso größer, je höher die Betonfestigkeit ist. Je geringer also die Wassermenge, desto empfindlicher reagiert der Beton auf ein frühzeitiges Austrocknen.

Neben dem ästhetischen Mangel, den solche Risse darstellen, können sie auch die Ursache für eine Zerstörung des Betons sein, wenn eindringendes Wasser unter Frostwirkung diesen Zerstörungsprozess auslöst. Der Wasserverlust kann auch die vollständige Hydratation des Zements verhindern. Die Betonoberfläche weist dann eine niedrige Festigkeit und eine hohe Porosität auf. Solcher Beton zeigt unter widrigen Umweltbedingungen ein unbefriedigendes Verhalten mit Wasserinfiltration, dem Herauslösen einzelner großer Gesteinskörner, Absanden und Abplatzungen.



Abb. 3.2.6 Oberflächliche Risse als Folge des plastischen Schwindens



Abb. 3.2.7 Rissnetz aufgrund plastischen Schwindens auf einer Parkhausdecke

Vermeidungsmaßnahmen

Die Rissbildung wegen plastischen Schwindens kann wie folgt vermieden werden:

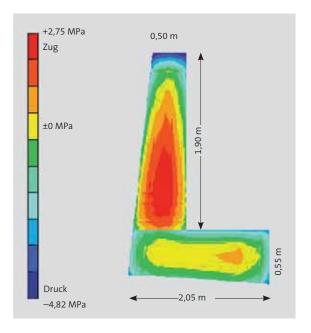
- die in Kapitel 2.7 beschriebenen Nachbehandlungsmaßnahmen sind umgehend zu ergreifen, um die Verdunstung möglichst gering zu halten
- Wasserentzug durch Schalung und Untergrund durch deren Vornässen verhindern
- nach Möglichkeit nicht unter extremen Witterungs- oder Temperaturbedingungen betonieren; andernfalls Befolgen der in den Kapiteln 2.13 und 2.14 abgegebenen Empfehlungen
- Polypropylenfasern beimischen (siehe auch Kap. 1.5 «Fasern»).

Thermisches Schwinden

Aufgrund der freigesetzten Hydratationswärme erwärmt sich erhärtender Beton zunächst.

Ist dieser Prozess im Alter von zehn Stunden bis mehreren Tagen abgeschlossen, kühlt der Beton wieder ab und thermisches Schwinden setzt ein. Das Rissrisiko infolge thermischen Schwindens ist umso höher, je schneller sich Temperaturänderungen ergeben.

Massige Bauteile unterliegen einem erhöhten Risiko und bedingen besondere Vermeidungsmaßnahmen. Abb. 3.2.8 zeigt eine Momentaufnahme zur Zeit des höchsten Rissrisikos für die Wand (5 Tage nach dem Betonieren). Das Fundament wurde 7 Tage vor der Wand betoniert, die Spannungen klingen daher bereits ab.



Vermeidungsmaßnahmen

Die Rissbildung wegen thermischen Schwindens kann wie folgt vermieden werden:

- Verwenden von Zementen mit niedrigerer Hydratationswärme und Festigkeitsklasse:

 Besonders geeignet sind Hochofenzemente mit einem hohen Hüttensandgehalt (z.B. Holcim-Duo oder Holcim-Aqua).
- Betonrezepturen mit geringem Zementgehalt und einem hohen Anteil Betonzusatzstoff (Steinkohlenflugasche oder Kalksteinmehl)
- möglichst spät ausschalen.
 Nicht zum Zeitpunkt der höchsten Betontemperatur ausschalen, um keinen thermischen Schock zu provozieren (die Temperatur der Betonoberfläche erfährt beim Ausschalen eine abrupte Abkühlung)
- Betonierabschnitte geschickt wählen (Abb. 3.2.2 und 3.2.3)
- verstärkte und zeitlich ausgedehnte Nachbehandlungsmaßnahmen vorsehen (Thermomatten).

Abb. 3.2.8
Betonspannungen infolge Hydratationswärme in einer dicken Stützmauer.
Skala der berechneten Spannungen links und Maßangaben rechts



Abb. 3.2.9 Risse auf Grund von Trocknungsschwinden

Trocknungsschwinden

Bei den meisten der üblichen Betone wird das Schwinden zu einem großen Teil vom langsamen Austrocknen des Betons verursacht (Trocknungsschwinden) und zu einem kleineren von der Volumenverkleinerung, die mit der chemischen Reaktion zwischen Wasser und dem Zement einhergeht (chemisches oder autogenes Schwinden).

Die Abnahme der Betonabmessungen, die nach der Austrocknung im erhärteten Zustand beobachtet werden kann, wird als Trocknungsschwinden bezeichnet. Je schneller die Menge des freien Wassers im Gefüge abnimmt, desto stärker schwindet der Beton. Das Schwinden ist auch umso größer, je geringer die relative Feuchte der umgebenden Luft ist. Darüber hinaus hängt das Ausmaß des Trocknungsschwindens von der Menge des freien Wassers ab.

Das Endschwindmaß beträgt im Allgemeinen zwischen 0,3 und 0,8 mm/m. Wie aus Abb. 3.2.10 ersichtlich, hängt dieser Wert maßgeblich von der Wassermenge der Betonrezeptur ab. Da sich jede Erhöhung der Wasserdosierung beim Schwindmaß doppelt auswirkt, ist es von großer Bedeutung, die Wassermenge einer Betonmischung mit Hilfe einer geeigneten Wahl und regelmäßigen Kontrolle der Kornzusammensetzung, vor allem jener der Sandfraktion, möglichst gering zu halten.

Ist die Zementmenge gegeben, hängt das Endschwindmaß indirekt ebenfalls vom w/z-Wert ab. Es ist umso kleiner, je tiefer der w/z-Wert ist. Ist dagegen die Wassermenge gegeben, lässt sich das Schwindmaß über die Zementmenge praktisch nicht beeinflussen.

Bei hochfesten Betonen mit einem w/z-Wert <0,40 verringert sich das Endschwindmaß nicht mehr. Es ist im Gegenteil sogar eine tendenzielle Erhöhung zu beobachten, weil ein starker Anstieg des chemischen oder autogenen Schwindens die Reduktion des Trocknungsschwindens kompensiert.

Vermeidungsmaßnahmen

Die Rissbildung wegen Trocknungsschwindens kann wie folgt vermieden werden:

- Wahl eines gut abgestuften Korngemischs mit geringem Wasserbedarf
- durch die Beigabe von Fließmitteln den w/z-Wert auf ein optimales Maß reduzieren (im Allgemeinen w/z = 0,4 bis 0,5)
- Schwindfugen anordnen
- Betonieretappen geschickt wählen
- gemäß Kap. 2.7 empfohlene Nachbehandlungsmittel und -dauer anwenden
- Mindestbewehrung und/oder Stahlfasern vorsehen, um die Risse zu verteilen (viele Haarrisse sind wenigen, aber breiteren Rissen meist vorzuziehen).

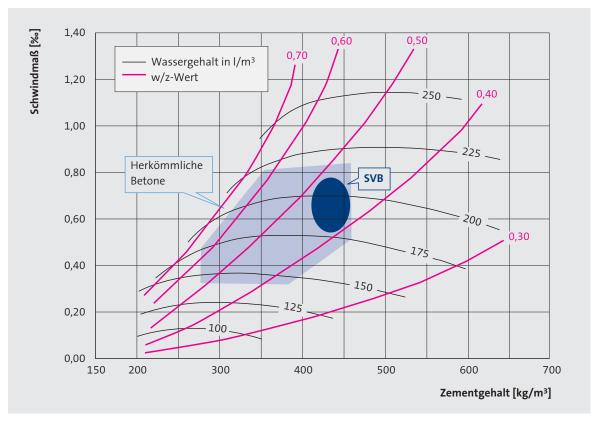


Abb. 3.2.10
Einfluss des Zementgehalts, des Wassergehalts und des Wasserzementwerts auf das Endschwindmaß (gemessen an Prismen der Abmessungen 100 x 100 x 400 mm bei einer relativen Luftfeuchte von 50% ab dem fünften Tag)

Schwindmaß von selbstverdichtenden Betonen

Bei selbstverdichtenden Betonen (SVB) können höhere Schwindmaße auftreten als bei Rüttelbetonen (Abb. 3.2.10). Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass das Rissrisiko dabei in keiner Weise zunimmt. Es ist dies wahrscheinlich den günstigen Wirkungen zuzuschreiben, die die Zunahme des Schwindmaßes ausgleichen:

- erhöhte Festigkeit des Betons (insbesondere Zugfestigkeit) wegen der höheren Zementmenge
- planmäßig niedriger Wassergehalt
- leichte Verringerung des Elastizitätsmoduls des Betons wegen der größeren Menge an Zementleim, der weniger steif ist als das Korngerüst. Dies wiederum hat tendenziell zur Folge, dass die aus dem Schwinden resultierenden Zugspannungen reduziert werden

 Ausführung in größeren, dafür wenigen Betonieretappen und damit einhergehende Reduktion des differenziellen Schwindens aus unterschiedlichen Betonaltern.

Bemerkung

Bei Rüttelbeton für übliche Hochbauten der Festigkeitsklasse C20/25 und der Expositionsklasse XC1 liegt das Schwindmaß in der gleichen Größenordnung wie bei SVB.

Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion

Wie kommt es zur Karbonatisierung?

Als Karbonatisierung wird die chemische Reaktion des Kohlendioxids [CO₂] der Luft mit dem Calciumhydroxid [Ca(OH)₂] des Betons bezeichnet. Sie ist ein Vorgang, der an der Oberfläche des Betons beginnt und langsam ins Innere fortschreitet. Den Beton selber beeinflusst sie positiv, weil sie ihn kompakter macht und seine Festigkeit und Dauerhaftigkeit erhöht. Die Karbonatisierung schützt den Beton gegen das Eindringen von Gasen und Flüssigkeiten. Somit stellt sie für den unbewehrten Beton einen durchaus vorteilhaften Vorgang dar.

Wirkungen der Karbonatisierung im bewehrten Beton

Demgegenüber kann die Karbonatisierung indirekt die Bewehrung des bewehrten Betons schwer schädigen. Im nicht karbonatisierten Beton schützt dessen hohe Alkalität (pH > 12) den Stahl vor Korrosion. Weil die Karbonatisierung die Alkalität reduziert (pH < 9), setzt die Korrosion ein, sobald die Karbonatisierungsfront (Abb. 3.3.1) die Zone der Bewehrung erreicht hat. Die Korrosion ist mit einer Volumenvergrößerung der Bewehrung verbunden, die zu einem Absprengen der Betondeckung führen kann (Abb. 3.3.2). Der Korrosionsfortschritt der Bewehrungsstäbe wird dadurch stark beschleunigt, womit der Beton rasch seine Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit verliert.



Abb. 3.3.1
Karbonatisierungsfront, die mit dem
Phenolphthalein-Test auf einem Betoneinschnitt sichtbar gemacht worden ist.
Wo das Phenolphthalein den Beton
violett einfärbt, ist der Beton noch nicht
karbonatisiert



Abb. 3.3.2
Bauteil, bei dem die ungenügende
Überdeckung der Bewehrung als Folge
der Karbonatisierung und der Korrosion
abgesprengt worden ist

Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion

Geschwindigkeit der Karbonatisierung

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Karbonatisierungsfront ins Betoninnere bewegt, ist umso höher, je poröser der Beton ist. Sie nimmt mit der Zeit allmählich ab (Abb. 3.3.3). Daneben beeinflussen eine Reihe weiterer Faktoren, wie Zementgehalt, Temperaturverlauf, alternierende, dauernde oder überhaupt keine Benetzung mit Wasser die Karbonatisierungsgeschwindigkeit und damit die Karbonatisierungstiefe.

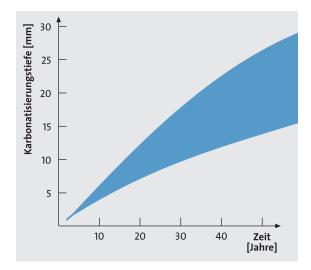


Abb. 3.3.3 Die Karbonatisierungstiefe als Funktion der Zeit variiert – je nach den einwirkenden Faktoren – in einem weiten Bereich

Vermeidungsmaßnahmen

Um die karbonatisierungsbedingte Bewehrungskorrosion zu vermeiden, muss man dafür sorgen, dass die Karbonatisierungsfront nicht bis zur Bewehrung vorstößt. Dies wird erreicht durch:

- eine allseitige, genügende Überdeckung der Bewehrung, abgestuft zwischen 20 und 65 mm gemäß Expositionsklasse und Bewehrungstyp (Details siehe DIN 1045-1, Ziffer 6.3)
- je nach Expositionsklasse eine Zementdosierung von mindestens 280 bzw. 300 kg/m³ fertig verdichtetem Beton (gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2) und einen moderaten Wasserzementwert (gemäß Expositionsklasse nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2), um einen Zementstein von möglichst geringer Porosität zu erzielen
- eine nahezu vollständige Verdichtung, d.h. Minimierung des Anteils an Verdichtungsporen
- eine gute Nachbehandlung des Betons, damit die Betonoberfläche auch nach dem Ausschalen keinen Feuchtigkeitsverlust erleidet und vollständig hydratisieren kann.

Ursachen und Vermeidung von Betonschäden

Ausblühungen

Was sind Ausblühungen?

Zugabewasser enthält immer einen gewissen Anteil gelöster Stoffe. Beim Betonmischvorgang können weitere Stoffe gelöst werden, oder sie gelangen bei der Zementhydratation ins Wasser. Beim Austrocknen des Betons werden die gelösten Stoffe an der Betonoberfläche aus dem verdunstenden Wasser ausgeschieden und bilden weißliche Beläge – Ausblühungen.

Kalkausblühungen

Am häufigsten sind die weißen Ausblühungen, verursacht durch Calciumhydroxid $[Ca(OH)_2]$, das bei der Zementhydratation freigesetzt wird. Nach dem Verdunsten des Anmachwassers auf der Betonoberfläche wird das zurückbleibende Calciumhydroxid durch das Kohlendioxid $[CO_2]$ der Luft rasch in wasserunlösliches Calciumkarbonat $[CaCO_3]$ umgewandelt. Wiederholt sich das Benetzen und Austrocknen des Betons einige Male, so wird die Calciumkarbonatschicht an der Oberfläche so dick, dass sie als weißer Fleck sichtbar wird (Abb. 3.4.1). Voraussetzung für das Entstehen von Calciumkarbonat-Ausblühungen ist also das mehrfache teilweise oder vollständige Benetzen und Austrocknen des jungen Betons.

Wann kommt es zu Kalkausblühungen?

Wiederholte Durchfeuchtung und Austrocknung begünstigt die Entstehung von Kalkausblühungen. Eine wichtige Rolle spielt daher auch die Witterung, der junger Beton ausgesetzt ist. Im Allgemeinen bilden sich Kalkausblühungen vorwiegend bei feuchter und kalter Witterung (Ende des Herbsts, Frühlingsbeginn). Die Durchfeuchtung kann durch Regen, Schnee, Nebel oder Kondenswasser verursacht werden.

Die Entstehung von Kalkausblühungen wird auch begünstigt durch:

- hohe Porosität des Betons, weil das Wasser dann leicht im Betoninnern zirkulieren kann
- hohe Zugabewassermenge.

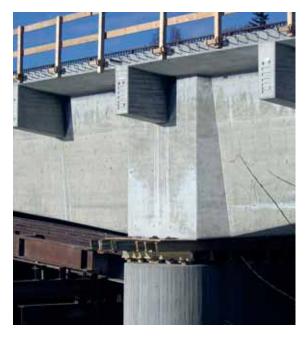


Abb. 3.4.1 Kalkausblühungen an einer Brücke

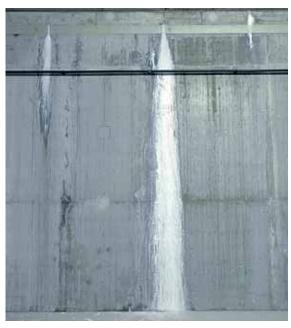


Abb. 3.4.2
Kalkaussinterung
(d.h. dauernde
Kalkauswaschung)
als Folge undichter
Fugen und dauernden Wasserzuflusses

Ursachen und Vermeidung von Betonschäden

Ausblühungen

Entfernen von Ausblühungen

Treten Ausblühungen nur örtlich beschränkt auf, lassen sie sich durch Abbürsten mit einem Stück Schaumglas oder, unter der Anleitung von Fachleuten und unter genauer Beachtung der Vorsichtsregeln, mit den bekannten säurehaltigen Spezialprodukten entfernen. Ausblühungen können auch nach Jahren von selber verschwinden, wenn das betreffende Bauteil immer wieder dem Regen ausgesetzt ist.



Abb. 3.4.3 Kalkausblühungen an einer Betonmauer, die einen Tag nach dem Ausschalen dem Regen ausgesetzt wurde

Ausblühungen durch Alkalisalze

Mitunter werden Ausblühungen auch durch im Wasser leicht lösliche Alkalisalze verursacht. Wegen ihrer guten Löslichkeit lassen sie sich durch Abbürsten mit Wasser leicht entfernen, oder aber sie verschwinden nach einem ausgiebigen Regen von selbst.

Vermeiden von Ausblühungen

Es ist schwierig, Ausblühungen vollständig zu vermeiden, wenn das Betonbauteil notwendigerweise der Witterung ausgesetzt ist. Folgende Maßnahmen werden empfohlen:

- möglichst wenig Zugabewasser (u.U. durch Verwenden von Fließmitteln), Herstellung eines möglichst dichten, wenig porösen Betons
- jungen Beton durch Abdecken (mit Plastikfolie o.Ä.) vor Regen schützen, insbesondere bei ungeschützten Mauerkronen (Abb. 3.4.3)
- Vermeiden von Kondenswasser, indem für guten Luftzutritt zu allen Betonoberflächen gesorgt wird (z.B. Betonteile nicht aufeinander stapeln)
- Verwenden von Zementen, die latent, hydraulische oder puzzolanische Zusätze enthalten. Diese verwandeln überschüssiges Calciumhydroxid noch im Betoninneren in wasserunlöslichen Zementstein. Geeignete Zemente sind Holcim-Ferro, Holcim-Duo, Holcim-Aqua oder Holcim-Trass
- Zugabe von Stoffen mit hoher puzzolanischer Aktivität wie Steinkohlenflugasche oder Silicastaub zum Beton. Anwendungen vor allem bei Betonflachdächern
- Verwenden von sehr feinen Zusatzstoffen (Silicastaub), um das Wasserrückhaltevermögen des Betons zu erhöhen
- Überziehen der Betonoberfläche mit geeigneten Mitteln (Farb- oder Kunstharzüberzug)
- periodisches Tropfen von Dachrinnen, abtropfendes Kondenswasser von Wasserleitungen oder Blechen auf «junge» Betonbauteile ist unbedingt zu vermeiden.

Da Ausblühungen auf sehr vielen schlecht oder gar nicht kontrollierbaren Faktoren beruhen, muss man im Einzelfall mit den empfohlenen Abhilfemaßnahmen experimentieren, um die wirksamste Methode oder eine Kombination verschiedener Methoden zu finden.

Angriff durch Frost und Taumittel

Angriff durch Frost

Die Schädigung des Betons durch periodisches Gefrieren und Tauen erfolgt vor allem durch die Umwandlung des Wassers in den Poren des Zementsteins und der Gesteinskörnung in Eis. Die Eisbildung ist mit einer rund zehnprozentigen Volumenvergrößerung verbunden. Diese, aber auch die dadurch bewirkte Verdrängung des noch nicht gefrorenen Wassers im Betoninnern, bewirken hohe innere Drücke und Spannungen. Überschreiten diese die Betonfestigkeit, wird der Beton geschädigt. Es entsteht bei häufiger Wiederholung des Frost-Tau-Zyklus ein dichtes Netz von Mikrorissen in den oberflächennahen Betonschichten, die zu einer erheblichen Festigkeitsminderung und schließlich zu Abplatzungen an der Oberfläche und zum Zerbröckeln des Betons führen.

Temperaturstürze im Beton unter den Gefrierpunkt sind umso gefährlicher, je rascher und je häufiger sie erfolgen. Allerdings müssen die Poren des Betons voll Wasser, d.h. der Beton muss fast mit Wasser gesättigt sein, damit es zu einer Schädigung des Betons kommt. Deshalb sind senkrechte Betonoberflächen von Frostschäden weniger betroffen.

Einwirkung von Tausalzen

Die Schädigung des Betons durch Tausalze (oder andere, den Gefrierpunkt des Wassers senkende Mittel) ist die Folge des durch die genannten Mittel in den oberflächennahen Schichten des Betons verursachten thermischen Schocks. Die Taumittel entziehen dem Beton die für das Aufschmelzen des Schnees oder Eises notwendige Wärme. Dies verursacht einen besonders raschen Temperatursturz, der durch den gleichen Mechanismus wie bei der Frosteinwirkung Scherspannungen hervorruft, die zu Abplatzungen an der Betonoberfläche führen können. Allerdings ist die schädigende Einwirkung der Taumittel sehr viel intensiver als die bloße Frosteinwirkung.

Chloride

Es ist unvermeidlich, dass die im Schmelzwasser gelösten Chloride, die aus den in der Praxis fast ausschließlich verwendeten Tausalzen (Calcium- oder Natriumchlorid) stammen, mehr oder weniger tief in den Beton eindringen. Sie stellen eine schwerwiegende Gefährdung der Bewehrung dar, weil sie deren Zerstörung durch Lochfraßkorrosion bewirken können (Abb. 3.5.1). Will man die chloridbedingte Bewehrungskorrosion vermeiden, muss man die teureren chloridfreien Taumittel (z.B. Glykole, Harnstoff) verwenden.

Die Gefährdung des Betons durch Tausalze beschränkt sich auf deren primäre Funktion als Taumittel während und unmittelbar nach dem Aufstreuen. Der Beton selber wird von gelösten Chloriden, sofern sie verdünnt vorliegen (wie z.B. im tausalzbeladenen Schmelzwasser oder in der von Fahrzeugrädern aufgewirbelten, tausalzbeladenen Gischt) nicht merklich angegriffen, wohl aber die Bewehrung (Abb. 3.5.1).



Abb. 3.5.1 Lochfraßkorrosion an Bewehrungsstahl

Ursachen und Vermeidung von Betonschäden

Angriff durch Frost und Taumittel

Betonzusammensetzung bei Frost -und Taumittelangriff

Die Wahl einer geeigneten Betonzusammensetzung kann Schäden durch Frost und Taumittel weitestgehend vermeiden. Grundsätzlich gilt, dass mit zunehmender Dichte des Betongefüges sich der Widerstand gegen das Eindringen von Wasser oder Chloriden – und damit die Beständigkeit – erhöht. Eine niedrige Kapillarität des Betons behindert den Wasserzutritt von außen und somit die Bildung von Eis in den Kapillarporen des Betons.

In DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 sind die Anforderungen an den Beton entsprechend seiner Exposition festgelegt, siehe Abb. 3.5.2. Dabei wird unterschieden zwischen einem Angriff mit und ohne Taumittel. Davon ausgehend werden sowohl der maximale Wasserzementwert als auch der Mindestzementgehalt festgelegt. Bei Angriff durch Taumittel sind zusätzlich künstliche Luftporen einzuführen, deren Gehalt vom verwendeten Größtkorn des Korngemischs abhängt (Abb. 3.5.3).

Abb. 3.5.2 Anforderungen an den Beton bei Frostund Taumittelangriff

Expositions- klasse	max. w/z bzw. w/z _{eq}	Mindest- druckfestig- keitsklasse [MPa]	Mindest- zement- gehalt [kg/m³]	Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen [kg/m³]	Mindest- luftgehalt [Vol%]	Andere Anforderungen
XF1	0,60	C25/30	280	270	_	F ₄ ⁴⁾
XF2	0,55 ¹⁾	C25/30	300	1)	2)	MS ₂₅ ⁴⁾
	0,50 1)	C35/45	320	1)	_	
XF3	0,55	C25/30	300	270	2)	F ₂ ⁴⁾
	0,50	C35/45	320	270	_	
XF4	0,50 ⁴⁾	C30/37	320	1)	2), 3)	MS ₁₈ 4)

- Die Anrechnung auf den Mindestzementgehalt und den w/z-Wert ist nur bei Verwendung von Flugasche zulässig. Zusatzstoffe des Typs II dürfen zugesetzt, aber nicht auf den Zementgehalt oder den w/z_{eq} angerechnet werden. Bei gleichzeitiger Zugabe von Flugasche und Silicastaub ist eine Anrechnung auch für die Flugasche ausgeschlossen.
- 2) Mittlerer Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau: es gelten die Angaben von Abb. 3.5.3.
- ³⁾ Herstellung ohne Luftporen zulässig für erdfeuchten Beton mit w/z-Wert ≤ 0,40 sowie sowie unter bestimmten Voraussetzungen bei CEM III/B für Meerwasserbauteile und Räumerlaufbahnen.
- 4) Gesteinskörnungen mit Regelanforderungen und zusätzlichem Widerstand gegen Frost bzw. Frost und Taumittel (siehe DIN EN 12620)

Abb. 3.5.3 Anpassungen des Mindestluftgehalts

	Nennwert des Größtkorns [mm]			
	8	16	32	63
Mindestluftgehalt				
[Vol%]	5,5	4,5	4,0	3,5

Einzelwerte dürfen diese Werte um maximal 0,5 % unterschreiten.

Angriff durch Frost und Taumittel

Wirkungsweise der Luftporen im Beton

Mit Hilfe von Zusatzmitteln (Luftporenbildner) werden künstlich kleine, fein verteilte kugelige Mikroluftporen in den Beton eingeführt, die eine bestimmte Größe (Durchmesser ≤ 0.3 mm) und einen bestimmten maximalen Abstand zueinander (Abstandsfaktor AF ≤ 0.2 mm) aufweisen sollten.

Die positive Wirkung dieser eingeführten Luftporen ist vor allem darauf zurückzuführen, dass dem gefrierenden Wasser im Beton Expansionsplatz zur Verfügung gestellt wird. Des Weiteren wird das sonst durchgängige Kapillarsystem des Betons unterbrochen und damit die Wasseraufnahme des Betons verringert. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen hängt wesentlich vom Einhalten der Mindestluftgehalte und des Abstandsfaktors ab.

Neben der positiven Wirkung der Mikroluftporen kommt es zu einem Festigkeitsabfall des Betons. Dieser entspricht etwa folgender Beziehung:

+ 1% Luftporengehalt → f_c ≈ - 2 bis - 3 MPa

Dieser Einfluss kann durch entsprechende betontechnologische Maßnahmen wie die Verwendung hochwertiger Zemente und das Absenken des Wasserzementwerts kompensiert werden.

Neben den Anforderungen an die Betonzusammensetzung ist auf die Verwendung frostbeständiger Gesteinskörnungen zu achten.

Grundsätzlich ist die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton sehr anspruchsvoll und wird von vielen Faktoren beeinflusst:

- verwendete Betonausgangsstoffe
 (Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoffe, Zusatzmittel)
- Konsistenz des Betons
- Mischzeit und -intensität
- Temperatur
- Einbauart
- Verdichtungsart und -dauer.

Prüfmethoden zur Bestimmung der Luftporen im Beton

Der Luftporengehalt lässt sich sowohl am Frischbeton als auch am Festbeton überprüfen. Wegen seiner einfachen Handhabung wird am häufigsten der Luftporentopf (Druckausgleichsverfahren) benutzt (Abb. 3.5.4). Das Bestimmen der Porenkennwerte (Durchmesser, Abstandsfaktor) am Festbeton erfolgt über eine mikroskopische Porenanalyse (Abb. 3.5.5 und 3.5.6). Dazu werden aus Festbetonproben Dünnschliffe hergestellt, die Porenkennwerte ermittelt und mit Erfahrungswerten verglichen. Für eine solche Analyse sind spezielle Messeinrichtungen erforderlich.



Abb. 3.5.4 Gerät zur Messung des Luftgehalts von Frischbeton (Luftporentopf)

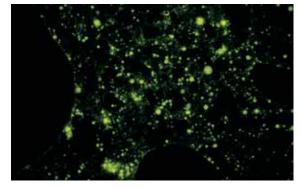


Abb. 3.5.5 Für Frost-Taumittelbeständigkeit erforderliche gleichmäßige Luftporenverteilung (mikroskopische Dünnschliffaufnahme, 5x vergrößert)

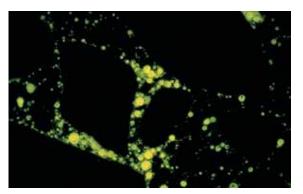


Abb. 3.5.6 Ungleichmäßige, deshalb für Frost-Taumittelbeständigkeit inakzeptable Luftporenverteilung (mikroskopische Dünnschliffaufnahme, 5x vergrößert)

Angriff durch chemische Stoffe

Arten der chemischen Schädigungen

Je nach der Art des chemischen Angriffes bleibt der Beton entweder beständig oder zersetzt sich mehr oder weniger rasch. Im Wesentlichen sind zwei Arten von Schädigungen zu unterscheiden.

Chemische Zersetzung

Eine chemische Zersetzung des Betons ist gekennzeichnet durch die Auflösung eines oder auch mehrerer Bestandteile des erhärteten Zementsteins durch einen von außen einwirkenden chemischen Stoff (Abb. 3.6.1). Der oder die betreffenden Bestandteile werden dabei aus dem Beton ausgelaugt, wodurch der Beton immer poröser wird und damit nicht nur an Festigkeit, sondern auch seine Schutzfunktion gegen die Bewehrungskorrosion verliert. Dieser Vorgang beginnt immer an der Kontaktfläche zwischen Beton und dem chemisch wirkenden Stoff und schreitet (meist langsam) ins Betoninnere fort.

Chemisch bewirktes Ouellen

Eine zweite Art der chemischen Schädigung wird in Gegenwart von Kapillarporenwasser durch die Reaktion eines chemisch wirksamen Stoffs mit einem oder mehreren Bestandteilen des erhärteten Zementsteins verursacht. Entsteht bei dieser Reaktion ein festes Produkt, das ein größeres Volumen besitzt als die festen Ausgangsstoffe zusammen, kommt es zu einem Quellen des Betons. Da die dadurch hervorgerufenen Spannungen bald die Betonfestigkeit übersteigen, bilden sich Risse, die sich langsam, aber stetig ausbreiten, oft auch in vom Ort der Reaktion entfernten Zonen.

Vermeidungsmaßnahmen

Der Schutz des Betons vor dem Angriff chemischer Stoffe von außen erfordert:

- die Herstellung und Verarbeitung eines dichten, demzufolge wenig porösen Betons mit einem w/z-Wert zwischen 0,45 und 0,50
- eine erhöhte (durch den Planer gemäß spezifischen Gegebenheiten festzulegende) Überdeckung des Betons, ohne jede Ausnahme auch bei Scheinfugen, Fugen und Abtreppungen

Muss mit dem Angriff gelöster Sulfate gerechnet werden, sind die erwähnten Maßnahmen durch die Verwendung eines Zements mit hohem Sulfatwiderstand (HS gemäß Kap. 1.1) zu ergänzen. Hierfür kommen die Holcim Zemente Holcim-Sulfo und Holcim-Aqua in Betracht (siehe auch Kap. 3.7 «Angriff durch Sulfate»).

Beton ist nur gegenüber sehr schwachen Säuren einigermaßen beständig. Schon Säuren mittlerer Stärke und erst recht starke Säuren zersetzen ihn jedoch bis zur Gebrauchsuntauglichkeit. Neben den schon erwähnten Maßnahmen ist zu seinem Schutz vor solchen Säuren zusätzlich eine säurebeständige Beschichtung (Kunstharze, Keramik usw.) erforderlich. Für die Herstellung von Betonen, die einem aggressiven Milieu ausgesetzt sind, sind hüttensandhaltige Zemente besonders geeignet.

Hüttensandhaltige CEM II Zemente (Holcim-Ferro) und speziell die Hochofenzemente (Holcim-Duo oder Holcim-Aqua) haben ein hohes Nacherhärtungspotential, was die Entstehung eines dichten Betongefüges fördert.



Abb. 3.6.1 Von Säure angegriffenes Zementmörtelprisma (rechte Prismenhälfte)

Angriff durch chemische Stoffe

Wirkung verschiedener chemischer Stoffe

Abbildung 3.6.2 zeigt, ob und wie verschiedene, häufig mit Beton in Berührung kommende chemische Stoffe auf diesen einwirken.

Chemischer Stoff	Verhalt	en des (unbewehrten)	Betons	Verhalten des bewehrten Betons
	Keine Schädigung	Chemische Zersetzung	Quellen	Schädigung durch Bewehrungskorrosion
Schwache Basen	•			
Starke Basen	•			
Schwache Säuren		•		•
Starke Säuren		**		•
Regenwasser, destilliertes, entmineralisiertes Wasser		•		•
Öle, Fette		•		
Gelöste Sulfate			•	•
Gelöste Chloride	•			•
Kohlendioxid (CO ₂)	•			

Abb. 3.6.2 Wirkung chemischer Stoffe auf Beton

- keine Schädigung
- direkter Angriff
- Bewehrungskorrosion als Folge der oberflächlichen Zerstörung des Betons oder seiner bis zur Bewehrung vorgedrungenen Karbonatisierung

Bei der Festlegung des Betons nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 müssen die einwirkenden Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Dabei unterscheiden die Normen zwischen verschiedenen Expositionsklassen, wie z.B. chemischem Angriff (XA) oder durch Karbonatisierung ausgelöster Korrosion (XC). Weitere diesbezügliche Angaben finden sich in Kap. 2.2 «Einteilung des Betons».

Angriff durch Sulfate

Chemische Vorgänge beim Sulfatangriff

Sulfate in wässriger Lösung können erhärteten Beton angreifen. Sie reagieren mit dem Tricalciumaluminat des Zementsteins unter starker Volumenvergrößerung zu den Phasen Ettringit oder Thaumasit. Die Schädigung des Betongefüges durch diesen Prozess wird als Sulfattreiben bezeichnet.

Schäden durch Sulfatangriffe

Der Sulfatangriff bedroht vor allem erdberührende Betonkonstruktionen und -bauteile. Im Untergrund vorhandene wasserlösliche, sulfatische Mineralien wie Gips und Anhydrit (Calciumsulfat) sind potentielle Sulfatquellen. Selbst weit entfernte Sulfatvorkommen können zu einer Gefährdung führen, da die Sulfate durch die Zirkulation unterirdischer Wässer zum Betonbauwerk gelangen können. Kanalbauten zur Ableitung von Abwässern aus Haushalten oder Industrie können durch Sulfatangriffe geschädigt werden, weil solche Abwässer oft gelöste Sulfate enthalten. Die Schädigung des Betons geht von einer Volumenvergrößerung aus, die zu einer starken Rissbildung führt (Abb. 3.7.1). Allerdings gehen diese Vorgänge relativ langsam vor sich, sodass provisorische Bauten keinen besonderen Schutz erfordern.

Abb. 3.7.1 Volumenvergrößerung (Treiben) eines in stark sulfathaltiger Lösung gelagerten Zementmörtelprismas



Abb. 3.7.2 Tübbings – Bauteile, die oft in sulfathaltiger Umgebung eingebaut werden

Vermeidungsmaßnahmen

Muss davon ausgegangen werden, dass der Beton mit gelösten oder im Boden vorkommenden Sulfaten im Kontakt stehen wird, sind folgende Vorsichtsmaßnahmen zu treffen:

- der eingebrachte Beton muss sehr dicht sein, d.h. eine niedrige Porosität haben
- der w/z-Wert des Frischbetons soll 0,50 nicht überschreiten
- ist anzunehmen, dass der Beton mit zirkulierendem Wasser mit einem Sulfatgehalt von mehr als 600 mg SO₄/l oder mit Erdschichten mit einem Sulfatgehalt von mehr als 3000 mg SO₄/kg in Kontakt stehen wird, soll gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 ein Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS gemäß Kap. 1.1) verwendet werden. Hierfür kommen in Betracht:
- Portlandzemente der mit besonders niedrigem Gehalt an Tricalciumaluminat von C₃A ≤ 3M.-% (Holcim-Sulfo)
- Hochofenzemente wie Holcim-Aqua mit einem Gehalt an Hüttensand von mindestens 66M.-%.
 DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 berücksichtigen sulfathaltige Grundwässer und natürliche Böden unter der Expositionsklasse des chemischen Angriffs, XA1 bis XA3 (siehe Kap. 2.2). Erfolgt wegen des erhöhten Sulfatgehalts im Grundwasser oder Boden die Zuordnung zu den Expositionsklassen XA2 oder XA3, sind Zemente mit einem hohen Sulfatwiderstand gemäß DIN EN 197-1 zu verwenden.



Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ist eine langsam verlaufende, chemische Reaktion zwischen so genannten «reaktiven» Gesteinskörnungen und Alkalien. Einige Gesteinskörnungen, wie mikrokristalline Quarze, Opale, Flint aber auch Feldspate oder Glimmer können unter bestimmten Bedingungen eine «reaktive» Wirkung im Beton entfalten. Diese Gesteinskörnungen werden instabil, wenn sie sich in einer alkalischen Lösung befinden, wie dies bei der Porenlösung des Betons (pH > 12) der Fall ist. Hauptträger löslicher Alkalien (Na+ und K+) im Beton ist der Zement. Die Alkalien können jedoch auch aus der Umgebung, z.B. aus Bergwässern, Tausalzen oder Meerwasser stammen. Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion findet nur statt, wenn eine hohe Luftfeuchte von über 80% oder Wasser in flüssigem Zustand als Reaktionspartner vorliegen.

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion führt zur Bildung eines quellfähigen Alkali-Kieselsäure-Gels. Im erhärteten Beton kann dieses hydrophile Gel zu Treiberscheinungen und – daraus resultierend – zu Rissen und Dehnungen führen.

Solche den Beton schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktionen sind vor allem in Norddeutschland aufgrund der dort vorkommenden Gesteine seit vielen Jahren bekannt. Indessen zeigen verschiedene Beobachtungen in den letzten Jahren, dass auch andere Regionen in Deutschland von diesem Phänomen nicht mehr verschont sind.

Die «Alkali Richtlinie» des DAfStB legt Maßnahmen fest, um AKR zu vermeiden. Sie fordert die Einstufung der Gesteinskörungen in Alkaliempfindlichkeitsklassen (Abb. 1.3.21) und die Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen für das Bauteil (Feuchteklassen, Abb. 1.3.20). Aufgrund dieser Einstufung sind die entsprechenden Maßnahmen zu treffen (Abb. 1.3.25 – 27). In vielen Fällen ist die Verwendung von Zementen mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA-Zemente nach DIN 1164-10) zwingend vorgeschrieben. Die Holcim (Deutschland) AG bietet daher viele ihrer Zemente als NA-Zemente an. Auch die Verwendung hüttensandhaltiger Zemente kann zur Vermeidung von AKR beitragen. Hüttensande weisen in der Regel einen geringen Gehalt an löslichen Alkalien auf.

NA-Zemente

NA-Zemente nach DIN 1164-10 können als vorbeugende Maßnahme gegen schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktionen eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch einen besonders niedriges Na₂O-Äquivalent aus und dienen nicht als Alkalienquelle für AKR. Zur Auswahl stehen die Holcim Zemente Holcim-Pur 4-NA, Holcim-Pur 5-NA, Holcim-Sulfo, Holcim-Ferro 3-NA, Holcim-Duo 3- LH/NA, Holcim-Duo 4-NA und Holcim-Aqua.

Bedingungen für das Zustandekommen einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion kann nur erfolgen, wenn folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

- Vorhandensein von potenziell reaktiven Gesteinskörnungen
- genügend Feuchtigkeit im Beton
- hohe Porosität des Betons
- genügend lösliche Alkalien in der Porenlösung.



Ursachen und Vermeidung von Betonschäden

Alkali-Kieselsäure-Reaktion



Abb. 3.8.2 Starke Rissbildung infolge Quellens des Betons, verursacht durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

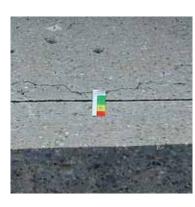


Abb. 3.8.3 AKR-Schaden an einer Betonplatte

Vorsorgliche Maßnahmen

Bei der Verwendung von Alkali-empfindlicher Gesteinskörnung ist gemäß der betreffenden Richtlinie der DAfStb zu verfahren.

Für den Fall, dass sich eine Gesteinskörnung als potenziell reaktiv erweist, wird allgemein empfohlen, die folgenden Maßnahmen zu ergreifen:

- beim Entwurf von Bauwerken sind konstruktive Maßnahmen vorzusehen, um das Eindringen von Wasser zu verhindern und damit das Risiko einer betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion möglichst gering zu halten. Wasser sollte dabei leicht abfließen oder durch geeignete Entwässerungssysteme sowie zuverlässige, kontrollierbare und unterhaltsarme Abdichtungen abgeleitet werden. Wasserführende Risse im Beton sollten durch eine gute Bewehrungs- und Fugenanordnung vermieden werden
- geeignete Betonzusammensetzung mit einem w/z-Wert < 0,50 wählen
- die Gesamtmenge der löslichen Alkalien im Beton auf ein sinnvolles Maß begrenzen, (ca. 3 kg/m³ im Fall herkömmlicher Bauwerke mit einer Nutzungsdauer von 50 Jahren)
- Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA-Zement gemäß DIN 1164-10) verwenden
- Hüttensandhaltige Zemente des Typs CEM II oder CEM III verwenden (z.B. Holcim-Ferro, Holcim-Duo, Holcim-Aqua). Hüttensande weisen in der Regel einen niedrigen Gehalt an löslichen Alkalien auf und fordern aufgrund ihrer ausgeprägten Nacherhärtung die Ausbildung von dichten Betongefügen.

Bauwerksteile in permanent trockener Umgebung (Expositionsklasse XC1) und einer Dicke unter 50 cm erfordern keine besonderen Maßnahmen. Dies gilt auch für provisorische Konstruktionen sowie für sekundäre und einfach ersetzbare Elemente.

Feuerbeständigkeit

Beton im Feuer

Beton brennt nicht. Selbst wenn er sehr hohen Temperaturen ausgesetzt wird, entwickelt er weder Rauch noch gibt er giftige Gase ab, er verhindert vielmehr die weitere Ausbreitung des Feuers. Wirkt Feuer auf den Beton ein, nimmt seine Temperatur nur langsam zu. Er bildet deshalb einen ausgezeichneten Schutz gegen die Feuerausbreitung, ohne dass er mit einem feuerfesten Schutz überzogen werden muss. Nur bei langandauernder, intensiver Feuereinwirkung kann es zu einem flächenhaften Abplatzen der Betonschicht über der Bewehrung kommen (Abb. 3.9.1).

Kritische Temperatur

Unter Feuerangriff ändern sich die Eigenschaften des Betons vor allem durch Gefügespannungen. Ursachen dafür sind die Veränderungen in der Gesteinskörnung ab rund 500°C (Quarzsprung, Kalzinierung des Kalksteins), Entwässerung des Zementsteins und Wasserdampfdruck, der dann auftritt, wenn sich bei schneller Erwärmung mehr Dampf bildet als abgeleitet werden kann. Beim Brand platzt daher Beton meist schalenförmig über der Bewehrung ab. Bei etwa 1200°C beginnt Beton zu schmelzen. Um solche enormen Temperaturen zu erzeugen, sind erhebliche Brandlasten nötig, wie sie zum Beispiel ein LKW mit brennenden Reifen verursachen kann.

Schutzmaßnahmen für besondere Fälle

Beton bietet einen ausgezeichneten Schutz gegen Feuer und hohe Temperaturen. Falls notwendig, kann man diesen durch die Reduktion der Betonporosität (d.h. vor allem durch die Reduktion des w/z-Werts) und durch eine erhöhte Bewehrungsüberdeckung noch verbessern.

Ist die Gefahr einer intensiven Feuereinwirkung besonders groß oder ist der Beton dauernd einer hohen Betriebstemperatur oder einer intensiven Wärmebestrahlung ausgesetzt, können zusätzliche Maßnahmen seine Feuerbeständigkeit noch erhöhen. Zu diesen zählen:

- Verwenden eines Zements mit hohem Hüttensandanteil (Holcim-Duo, Holcim-Aqua)
- Verwenden feuerbeständiger Gesteinskörnungen (Blähton, Blähschiefer, gebrannter Ton, Basalt usw.) anstelle der nicht völlig feuerbeständigen karbonatischen (Kalkstein, Dolomit) oder quarzhaltigen (Sandstein, Quarzit) Körnungen
- Zusatz eines keramischen Stabilisators (z.B. Ziegelmehl)
- Zugabe von 1 bis 4 kg/m³ Kunststofffasern (z.B. Polypropylenfasern). Das Schmelzen der Fasern ab rund 170°C führt zu einer Volumenreduktion, wodurch ein Teil des Wasserdampfdrucks abgebaut werden kann und sich massive Abplatzungen des Betons verhindern lassen.



Abb. 3.9.1
Freigelegte Betonbewehrung nach dem Abplatzen des Betons, verursacht durch einen Brand. Die Tragfähigkeit der Betonkonstruktion ist nicht beeinträchtigt

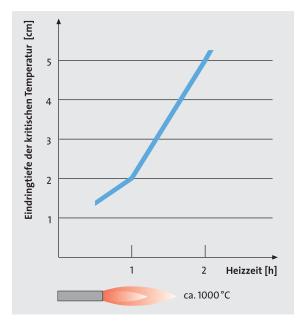


Abb. 3.9.2 Eindringtiefe der kritischen Temperatur (300°C) in Beton bei einer Beheizung mit 1000°C



Erläuterungen zur ZTV-ING

Erläuterungen zur ZTV-ING

Neue Regelungen für Ingenieurbauten des BMVBW

ZTV-ING steht für die «Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten» des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW). Zum 1. Mai 2003 hat dieses Regelwerk u.a. die «alte» ZTV-K «Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten» ersetzt. Die ZTV-ING bezieht sich auf die Regelwerke DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 sowie auf den DIN-Fachbericht 100 «Beton». Regelbaustoff nach ZTV-ING ist «Beton nach Eigenschaften». «Beton nach Zusammensetzung» bedarf der Zustimmung des Auftraggebers.

ZTV-ING weicht teilweise von der Norm ab

Die ZTV-ING übernimmt zwar die grundlegenden Anforderungen der Norm, bei der Wahl der Expositionsklassen und bei den zugehörigen Druckfestigkeitsklassen gibt es jedoch Abweichungen von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2. Nachfolgend sind die abweichenden betontechnologischen Eckdaten der ZTV-ING dargestellt.

Gesteinskörnungen	Organische Verunreinigungen
DIN EN 12 620	$Q_{0,05}$ für grobe Gesteinskörnungen; $Q_{0,25}$ für feine Gesteinskörnungen (Sand)
	Kornformkennzahl mindestens SI ₂₀ bei gebrochenem Material
	Kornzusammensetzung nur eng gestufte Gesteinskörnungen
	Zugabe in zwei bzw. drei getrennten Korngruppen
Beton DIN EN 206-1 und	CDF-Test als mögliche «Kontrollprüfung» für Expositionsklasse XF4
DIN 1045-2	Luftgehalt (Tab. 3.3.1, ZTV-ING) Anforderungen in Abhängigkeit der Konsistenz
	Betontemperatur (abweichend von DIN 1045-3) im Tunnelbau max. 25°C

Abb. ZTV.1 Anforderungen an Gesteinskörnungen und Beton

XF4, XD3
XF2, XD2
XF2, XD1
XD2
XD1
ND1
XD1
XD2
XF2. XD2

Abb. ZTV.2 Zuordnung der Expositionsklassen bei Frost- und/oder Tausalzeinwirkung

Erläuterungen zur ZTV-ING

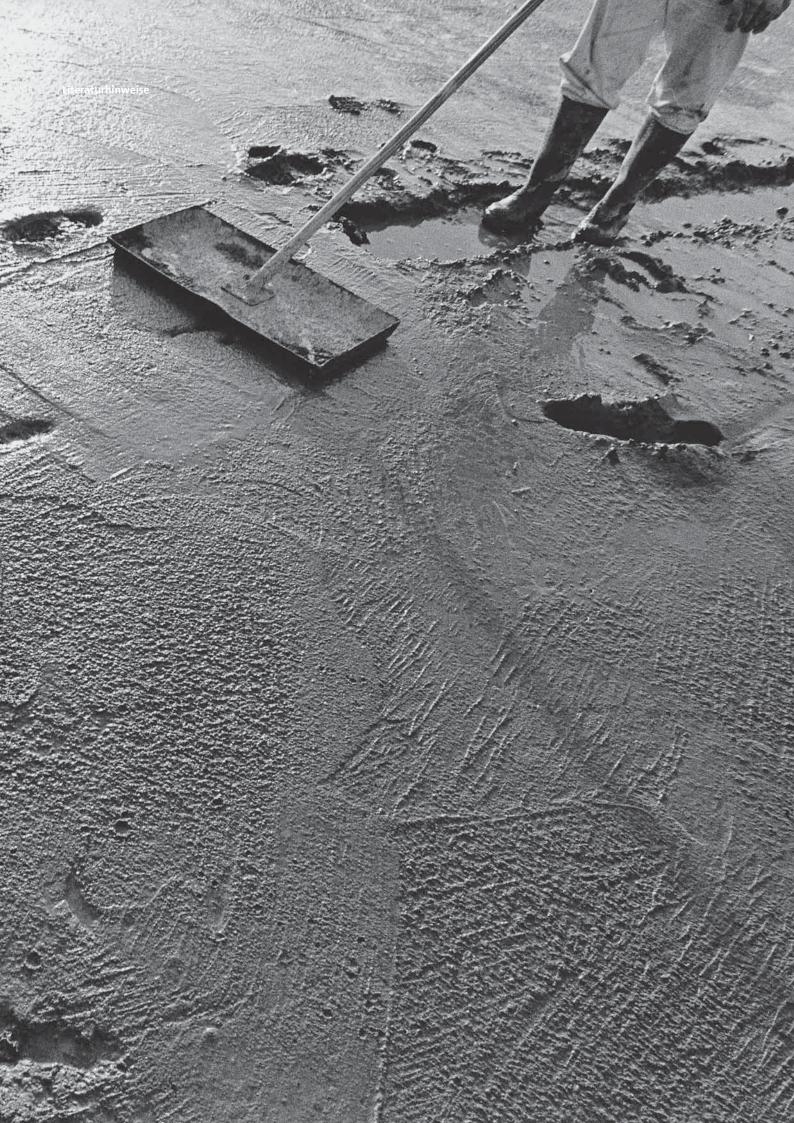
Erläuterungen zur ZTV-ING

Abweichung von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 (weiße Felder)	XF2	XF3		XD2; XA2	XF4 zusammen mit XD3
Max. w/z-Wert	0,50	0,50	0,55	0,50	0,50
Mindestdruckfestig- keitsklasse	C30/37	C30/37	C25/30	C30/37	C25/30
Min. z [kg/m³]	320	320	300	320	320
Min. z + FA [kg/m³]	keine Anrechnung	270+50	270+30	270+50	keine Anrechnung
LP	_	1)		-	_ 1)
Andere Anforderungen	Gesteinskörnung MS ₂₅	Gesteinskörnung F ₂	Gesteinskörnung F ₂	ggf. HS-Zement	Gesteinskörnung MS ₁₈
Bauteile (für Überbauten gilt DIN EN 206-1/ DIN 1045-2)	Widerlager, Stützen, Pfeiler, Tunnelsohlen, Tunnelwände, Tunnelschalen, Trogsohlen, -wände	Gründungen (z.B. Bohrpfähle)		Widerlager, Stützen, Pfeiler, Bohrpfähle Tunnelsohlen, Tunnelwände, Tunnelschalen, Trogsohlen, -wände	Kappen
¹) gemäß Tab. 3.3.1, ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 1, Beton					

Abb. ZTV.3 Grenzwerte der Betonzusammenstellung

Abb. ZTV.4 Besondere Anforderungen bezüglich der Verwendung von Zementen und Zusatzstoffen

Zement, Zusatzstoff	Regelungen nach ZTV-ING
CEM II-M, Portlandkompositzement	mit Zustimmung des Auftraggebers
CEM III, Hochofenzement	für Kappen und Betonschutzwände: nur CEM III/A ≤ 50 M% Hüttensandanteil
CEM II-P, Portlandpuzzolanzement	Trass nach DIN 51 043 als Puzzolan
Flugaschezugabe	max. 60 M% v. Zement; max. anrechenbar 80 kg/m ³
Hochofenzement CEM III/B und	für Gründungsbauteile (wie z.B. Bohrpfähle) erlaubt.
Flugasche	Weitere Anwendungen nur mit Zustimmung des Auftraggebers
Silicastaub	als homogene Suspension, ausgenommen Trockengemisch für
	Spritzbeton
Flugasche und Silicastaub gleich-	
zeitig (auch als Zementbestandteil)	mit Zustimmung des Auftraggebers



Literaturhinweise

Literaturhinweise

Bauteilkatalog;

Planungshilfe für dauerhafte Betonbauteile nach der neuen Normengeneration; Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 2006

Brameshuber;

 ${\sf Selbstverdicht} ender \ {\sf Beton}, \ {\sf Spezialbeton} \ {\sf Band} \ {\sf 5};$

Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 2004

Pickhardt, Bose, Schäfer;

Beton – Herstellung nach Norm;

Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 2006

Eifert, Bethge;

Beton – Prüfung nach Norm; Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 2005

Grübl, Weigler, Karl;

Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften;

Ernst & Sohn; Berlin 2001

König, Holschemacher, Dehn; Selbstverdichtender Beton;

Bauwerk; Berlin 2001

Locher;

Zement;

Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 2000

Richter;

Hochfester Beton – Hochleistungsbeton;

Spezialbeton Band 3; Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 1999 Scholz, Hiese; Baustoffkenntnis; Werner Verlag; München 2007

Schorn;

Spritzbeton;

Spezialbetone Band 6; Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 2005

Vollpracht, Eifert, Hersel;

Straßenbau heute – Betondecken;

Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 2004

Weber;

Guter Beton;

Verlag Bau + Technik; Düsseldorf 2007

Zement-Merkblätter Betontechnik;

Schriftenreihe des Bundesverbandes der Deutschen

Zementindustrie e.V.;

Köln

Zement-Taschenbuch; Verlag Bau + Technik;

Düsseldorf 2008



Normen/Richtlinien/Empfehlungen

Europäische Normen

DIN EN 196-1 bis -21:2005-05: Prüfverfahren für Zement

DIN EN 197-1/A3:2007-09: Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement

DIN EN 197-2:2000-11: Zement – Teil 2: Konformitätsbewertung

DIN EN 197-4:2004-08: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Hochofenzement mit niedriger Anfangsfestigkeit

DIN EN 206-1/A2:2005-09: Beton – Teil 1: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

DIN EN 450-1:2008-05: Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien

DIN EN 932, Teil 1–6: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen

DIN EN 933-4:2008-06: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen

DIN EN 934-1:2008-04: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 1: Gemeinsame Anforderungen

DIN EN 934-2:2006-03: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 2: Betonzusatzmittel – Definition, Anforderungen, Konformität, Kennzeichung und Beschriftung

DIN EN 1008:2002-10: Zugabewasser für Beton – Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton

DIN EN 1097, Teil 1–7: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen

DIN EN 1367, Teil 1–6: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen

DIN EN 12 390-2:2001-06: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen

DIN EN 12620:2008-07: Gesteinskörnungen für Beton

DIN EN 12878:2006-05: Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen – Anforderungen und Prüfverfahren

EN 13 055-1, Berichtigung 1:2004-12: Leichte Gesteinskörnungen – Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel

DIN EN 13 263-1/A1:2008-08 und DIN EN 13 263-2:2005-10: Silikastaub für Beton

DIN EN 14216:2004-08: Zement-Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme

DIN EN 14487-1:2005: Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegung und Konformität

DIN EN 14487-2:2006: Spritzbeton – Teil 2: Ausführung

Deutsche Normen

DIN 1045-1/A1:2007-05: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion

DIN 1045-2/A3:2008-01: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

DIN 1045-3:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung

DIN 1045-4:2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 4: Ergänzende Regeln für Herstellung und Überwachung von Fertigteilen

DIN 1100:2004-05: Hartstoffe für zementgebundene Hartstoffestriche – Anforderungen und Prüfverfahren

Normen/Richtlinien/Empfehlungen

Normen/Richtlinien/Empfehlungen

DIN 1164-10, Berichtigung 1:2005-01, DIN 1164-11:2003-11 und DIN 1164-12:2005-06: Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis

DIN 4226-100:2002-02: Gesteinskörnungen für Beton – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen

DIN V 18004:2004-04: Prüfverfahren für Gesteinskörnungen nach DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104

Weitere Richtllinien und Empfehlungen

Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb)

- Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel
- Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100
- Fließbeton; Herstellung, Verarbeitung und Prüfung
- Selbstverdichtender Beton
- Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie)
- Massige Bauteile aus Beton
- Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton

Merkblätter des Deutschen Betonvereins (DBV):

- Industrieböden aus Beton für Frei- und Hallenflächen
- Stahlfaserbeton
- Hochfester Beton
- Selbstverdichtender Beton
- Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau (1996)
- Grundlagen zur Bemessung von Industrieböden aus Stahlfaserbeton (1996)
- Stahlfaserbeton (2001)
- Technologien des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons (1996)

Zement-Merkblätter BetonMarketing Nord GmbH:

- Zemente und ihre Herstellung
- Gesteinskörnungen für Normalbeton
- Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe
- Frischbeton Eigenschaften und Prüfungen
- Überwachen von Beton auf Baustellen
- Transportbeton
- Expositionsklassen von Beton und besondere Betoneigenschaften
- Massenbeton
- Hochfester Beton/Hochleistungsbeton
- Risse im Beton
- Ausblühungen Entstehung, Vermeidung

- Selbstverdichtender Beton Eigenschaften und Prüfungen
- Sichtbeton Gestaltung von Betonoberflächen
- Schalung für Beton
- Wasserundurchlässige Betonbauwerke
- Industrieböden aus Beton

ZTV-ING – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, 2003-07

TL-Beton-StB 07 – Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, 2007

DIN-Fachbericht 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen

Flyer der Holcim (Deutschland) AG:

- Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2
- Betonieren bei heißem Wetter oder starkem Wind
- Betonieren bei kaltem Wetter
- Industrieböden aus Beton



Holcim (Deutschland) AG

Technical Marketing
Hannoversche Straße 28
31319 Sehnde-Höver
Technical-Marketing-DEU@holcim.com
www.holcim.de
Telefon (05132) 927-432
Telefax (05132) 927-430