

Betonbauwerke müssen die zu erwartenden Beanspruchungen sicher aufnehmen und über viele Jahrzehnte dagegen widerstandsfähig bleiben. Dies verlangt eine sach- und materialgerechte Konstruktion, Bemessung, Baustoffauswahl und Bauausführung. Festlegungen zur Dauerhaftigkeit bilden die Grundlage für diese Forderung. DIN EN 206-1 [1] und DIN 1045-2 [2] legen hierzu die notwendigen Eigenschaften, Zusammensetzungen und Konformitätsverfahren für Beton, Stahlbeton und Spannbeton fest.

1 Allgemeines

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken hat in Deutschland über das Bauproduktengesetz und die Landesbauordnungen den Rang einer gesetzlichen Anforderung. Das bedeutet, dass Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit gleichrangige Kriterien sind [3]. Nach DIN 1045-1 [4] gelten Bauwerke als dauerhaft, wenn sie während der vorgesehenen Nutzungsdauer ihre Funktion hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ohne wesentlichen Verlust der Nutzungseigenschaften bei einem angemessenen Instandhaltungsaufwand erfüllen. Die Anforderungen an den Beton sollten nach DIN EN 206-1 unter der Annahme einer beabsichtigten Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren bei den vorausgesetzten Instandhaltungsbedingungen für übliche Hochbauten festgelegt werden.

2 Expositionsklassen

Bei der Planung von Bauteilen bzw. Bauwerken sind sowohl die lastunabhängigen als auch die lastabhängigen Einwirkungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit zu berücksichtigen. Hierzu müssen geeignete Annahmen für die zu erwartenden Umwelteinwirkungen getroffen werden. In DIN 1045 sind die Anforderungen an den Beton in Abhängigkeit von den möglichen korrosiven Einwirkungen durch Expositionsklassen festgelegt. Betonzusammensetzung, Mindestdruckfestigkeitsklassen, Rechenwerte der Rissbreite, Betondeckung der Bewehrung und Nachbehandlungsdauer werden den Expositionsklassen zugeordnet.

Für die Festlegungen der Dauerhaftigkeit stehen insgesamt acht Exposi- und Feuchtigkeitsklassen zur Verfügung, die jeweils in bis zu vier weitere Unterklassen bzw. Angriffsstufen gegliedert sind. Unterschieden werden Einwirkungen auf die Bewehrung im Beton (Bewehrungskorrosion) sowie auf dem Beton selbst (Betonangriff). Darüber hinaus ist in jedem Fall auch eine Einstufung in eine Feuchtigkeitsklasse (WO, WF, WA oder WS) vorzunehmen.

Die Expositionsklasse X0 (kein Angriffsrisiko) gilt nur für Betone ohne Bewehrung, Stahlfasern oder eingebettetes Metall und nur in Innenräumen oder im Boden, wenn kein Korrosions- oder Angriffsrisiko vorliegt. Diese Exposi-

tionsklasse kann nur allein gelten und z. B. auf unbewehrte Fundamente zutreffen.

Mögliche lastunabhängige Einwirkungen auf die Bewehrung im Beton werden durch folgende Expositionsklassen erfasst:

- Expositionsklasse XC (Carbonation) – Beanspruchung durch Karbonatisierung
- Expositionsklasse XD (Deicing) – Beanspruchung durch Chlorideinwirkung aus Taumittel
- Expositionsklasse XS (Seawater) – Beanspruchung durch Chlorideinwirkung aus Meerwasser bzw. salzhaltiger Seeluft

Stahlfasern in Stahlfaserbetonen gelten in diesem Sinne nicht als Bewehrung. Aufgrund ihrer kleinen Abmessungen stellen sie auch im Korrosionsfall kein nennenswertes Risiko für die Dauerhaftigkeit des Bauteils dar. Eine Mindestbetondeckung für Stahlfasern ist daher nicht erforderlich und auch technisch nicht möglich. Dennoch sind auch Stahlfaserbetone ohne herkömmliche Bewehrung nach DAfStb-

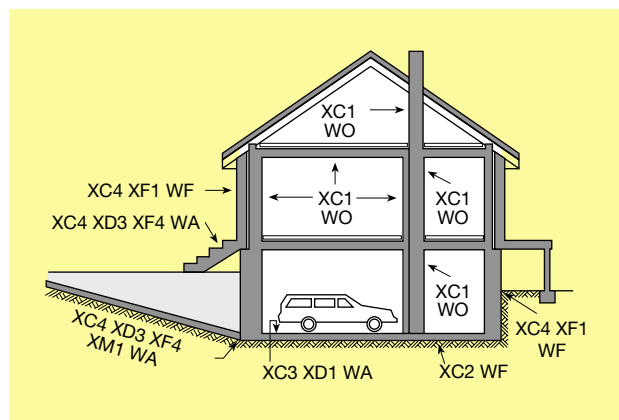


Bild 1: Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklassen an einem Wohnhaus

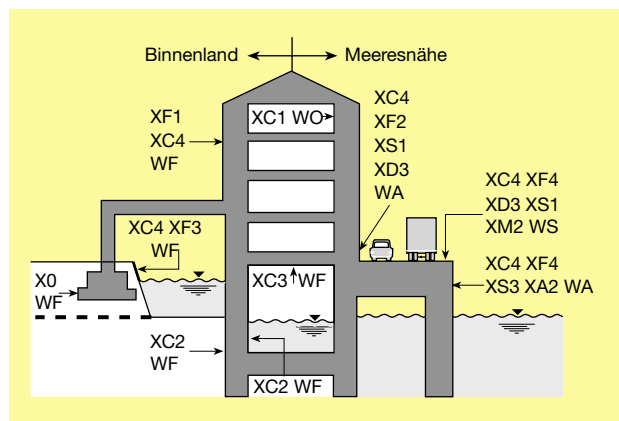


Bild 2: Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklassen im Hoch- und Ingenieurbau in Anlehnung an [3]

Richtlinie Stahlfaserbeton [5] ggf. in die Expositionsklassen XC, XD und XS einzustufen, um weitere mit den Expositionsklassen verknüpfte Anforderungen, wie z. B. Mindestdruckfestigkeitsklassen oder Rissbreitenbeschränkungen, richtig festzulegen. Da der Geltungsbereich der Richtlinie Stahlfaserbeton die Expositionsklassen XD2, XD3, XS2 und XS3 für den rechnerischen

Ansatz von Stahlfasern ausschließt, sind Stahlfaserbetone ohne herkömmliche Bewehrung für diese Expositionsklassen nicht geregelt.

Mögliche lastunabhängige Einwirkungen auf den Baustoff Beton werden berücksichtigt durch die Expositionsklassen:

Tafel 1: Expositionsklassen (infolge von Umwelteinwirkungen) bezogen auf Bewehrungskorrosion, nach [2], [4]

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)	Mindestdruckfestigkeitsklasse min f_{ck}
Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko <i>Bauteile ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall in nicht Beton angreifender Umgebung</i>			
X0	Ohne Bewehrung und alle Umgebungsbedingungen, außer XF, XA, XM	Füllbeton, Sauberkeitsschichten und dergleichen	C8/10
		Fundamente ohne Bewehrung ohne Frost Innenbauteile ohne Bewehrung	C12/15 ¹⁾
Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung <i>Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält und Luft sowie Feuchtigkeit ausgesetzt ist</i>			
XC1	trocken oder ständig nass	Bauteile in Innenräumen mit üblicher Luftfeuchte (einschließlich Küche, Bad und Waschküche in Wohngebäuden)	C16/20 ²⁾
		Beton, der ständig unter Wasser ist	
XC2	nass, selten trocken	Teile von Wasserbehältern	C16/20 ²⁾
		Gründungsbauteile	
XC3	mäßige Feuchte	Bauteile, zu denen die Außenluft häufig oder ständig Zugang hat, z. B. offene Hallen, Innenräume mit hoher Luftfeuchtigkeit z. B. in gewerblichen Küchen, Bädern, Wäschereien, in Feuchträumen von Hallenbädern und in Viehställen	C20/25
XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbauteile mit direkter Beregnung	C25/30
Bewehrungskorrosion durch Chloride ausgenommen Meerwasser <i>Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält und chloridhaltigem Wasser, einschließlich Taumitteln, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist</i>			
XD1	mäßige Feuchte	Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen	C30/37 ³⁾
		Einzelgaragen	
XD2	nass, selten trocken	Solebäder	C35/45 ^{3) 4) 5)}
		Bauteile, die chloridhaltigen Industrieabwässern ausgesetzt sind	
XD3	wechselnd nass und trocken	Teile von Brücken mit häufiger Beanspruchung durch chloridhaltiges Spritzwasser	C35/45 ^{3) 5)}
		Fahrbahndecken; direkt befahrene Parkdecks ⁶⁾	
Bewehrungskorrosion durch Chloride aus Meerwasser <i>Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält und Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Seeluft ausgesetzt ist</i>			
XS1	salzhaltige Luft, aber kein unmittelbarer Kontakt mit Meerwasser	Außenbauteile in Küstennähe	C30/37 ³⁾
XS2	unter Wasser	ständig unter Wasser liegende Bauteile in Hafenanlagen	C35/45 ^{3) 4) 5)}
XS3	Tidebereiche, Spritzwasser- und Sprühnebelbereiche	Kaimauern in Hafenanlagen	C35/45 ^{3) 5)}

¹⁾ Bei Beton für tragende Bauteile nach [4]

²⁾ Für Stahlfaserbetone nach DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [5] gilt für die Expositionsklassen XC1 und XC2 die Mindestdruckfestigkeitsklasse C20/25

³⁾ Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Expositionsklasse XF, eine Festigkeitsklasse niedriger. Diese Mindestdruckfestigkeitsklassen gelten für Luftporenbetone mit Mindestanforderungen an den mittleren Luftgehalt im Frischbeton nach DIN 1045-2 [2] unmittelbar vor dem Einbau. Eine weitere Abminderung der Mindestdruckfestigkeit beim Einsatz langsam oder sehr langsam erhärtender Betone ($r \leq 0,30$) ist nicht zulässig.

⁴⁾ Bei langsam und sehr langsam erhärtenden Betonen ($r \leq 0,30$) eine Festigkeitsklasse niedriger. Die Druckfestigkeit zur Einteilung in die geforderte Betondruckfestigkeitsklasse ist an Probekörpern im Alter von 28 Tagen zu bestimmen. Eine weitere Abminderung der Mindestdruckfestigkeit bei Einsatz von Luftporenbeton ist nicht zulässig.

⁵⁾ Bei massigen Bauteilen eine Festigkeitsklasse niedriger [2].

⁶⁾ Ausführung nur mit zusätzlichen Maßnahmen (z. B. rissüberbrückende Beschichtung, siehe DAfStb-Heft 526 [6])

- Expositionsklasse XF (Freezing) - Beanspruchung durch Frost mit/ohne Taumittleinwirkung
- Expositionsklasse XA (Chemical Attack) - Beanspruchung durch chemische Angriffe
- Expositionsklasse XM (Mechanical Abrasion) - Beanspruchung durch mechanischen Verschleiß

Seit 2008 wurden die gleichlautenden Tabellen der Expositions-klassen in DIN 1045-1 und 1045-2 um die so genannten Feuch-tigkeitsklassen erweitert. Diese sind aus der Alkali-Richtlinie [7] übernommen und definieren die Feuchtigkeitsbedingungen im Hinblick auf das Risiko einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR):

Tafel 2: Expositions-klassen (infolge von Umwelteinwirkungen) bezogen auf Betonangriff, nach [2], [4]

Klassen-bezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositions-klassen (informativ)	Mindestdruckfestigkeits-klasse min f_{ck}
Betonangriff durch Frost mit und ohne Taumittel <i>Durchfeuchteter Beton, der einem erheblichen Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist</i>			
XF1	mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	Außenbauteile ¹⁾	C25/30
XF2	mäßige Wassersättigung, mit Taumitteln	Bauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4	C35/45 ^{2) 3)} C25/30 (LP)
		Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser	
XF3	hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	offene Wasserbehälter	C35/45 ^{2) 3)} C25/30 (LP)
		Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser	
XF4	hohe Wassersättigung, mit Taumitteln	mit Taumitteln behandelte Verkehrsflächen	C30/37 (LP) ⁴⁾
		überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, Betonschutzwände	
		Räumlerlaufbahnen von Kläranlagen ⁵⁾	
		Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone	
Betonangriff durch aggressive chemische Umgebung <i>Beton, der chemischen Angriffen durch natürliche Böden oder Grundwasser gemäß Tafel 8 oder Meerwasser oder Abwasser ausgesetzt ist</i>			
XA1	chemisch schwach angreifende Umgebung	Behälter von Kläranlagen	C25/30
		Güllebehälter	
XA2	chemisch mäßig angreifende Umgebung und Meeresbauwerke	Betonbauteile, die mit Meerwasser in Berührung kommen	C35/45 ^{2) 3) 6)}
		Bauteile in Beton angreifenden Böden	
XA3	chemisch stark angreifende Umgebung	Industrieabwasseranlagen mit chemisch angreifenden Abwässern	C35/45 ^{6) 7)}
		Füttertische der Landwirtschaft	
		Kühltürme mit Rauchgasableitung	
Betonangriff durch Verschleißbeanspruchung <i>Beton, der einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist</i>			
XM1	mäßige Verschleiß-beanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luftbereifte Fahrzeuge	C30/37 ⁶⁾
XM2	starke Verschleiß-beanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummibereifte Gabelstapler	C35/45 ^{6) 8)}
XM3	sehr starke Verschleiß-beanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch elastomer- oder stahlrollenbereifte Gabelstapler	C35/45 ^{6) 9)}
		mit Kettenfahrzeugen häufig befahrene Oberflächen	
		Wasserbauwerke in geschiebelasteten Gewässern, z. B. Tosbecken	

¹⁾ Bei Möglichkeit hoher Durchfeuchtung bei Frost ist die Einstufung in die Expositions-klasse XF3 zu prüfen

²⁾ Bei langsam und sehr langsam erhärtenden Betonen ($r \leq 0,30$) eine Festigkeits-klasse niedriger. Die Druckfestigkeit zur Einteilung in die geforderte Betondruck-festigkeits-klasse ist an Probekörpern im Alter von 28 Tagen zu bestimmen. Eine weitere Abminderung der Mindestdruckfestigkeit bei Einsatz von Luftporenbeton ist nicht zulässig.

³⁾ Bei massigen Bauteilen eine Festigkeits-klasse niedriger [2].

⁴⁾ Erdfeuchter Beton mit $w/z \leq 0,4$ auch ohne Luftporen.

⁵⁾ Weitere Besonderheiten für Räumlerlaufbahnen und erdfeuchte Betone siehe DAfStb-Heft 525 [10].

⁶⁾ Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Expositions-klasse XF, eine Festigkeits-klasse niedriger. Diese Mindest-druckfestigkeits-klassen gelten für Luftporenbetone mit Mindestanforderungen an den mittleren Luftgehalt im Frischbeton nach DIN 1045-2 [2] unmittelbar vor dem Einbau. Eine weitere Abminderung der Mindestdruckfestigkeit beim Einsatz langsam oder sehr langsam erhärtender Betone ($r \leq 0,30$) ist nicht zulässig.

⁷⁾ Schutz des Betons erforderlich, ggf. Gutachter für Sonderlösung oder Ausnahmen aus abweichenden Normen

⁸⁾ Ohne Oberflächenbehandlung C35/45, mit Oberflächenbehandlung C30/37 (z. B. Vakuumieren mit nachfolgendem Flügglätten).

⁹⁾ Zusätzliche Oberflächenvergütung, z. B. durch Hartstoffe nach DIN 1100 [11], erforderlich.

Tafel 3: Feuchtigkeitsklassen bezogen auf Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Feuchtigkeitsklasse	Umgebung	Beispiele
WO	Beton, der nach normaler Nachbehandlung nicht länger feucht und nach Austrocknen während der Nutzung weitgehend trocken bleibt	Innenbauteile des Hochbaus; Bauteile, auf die Außenluft, nicht jedoch z. B. Niederschläge, Oberflächenwasser, Bodenfeuchte einwirken können und/oder die nicht ständig einer relativen Luftfeuchte von mehr als 80 % ausgesetzt werden
WF	Beton, der während der Nutzung häufig oder längere Zeit feucht ist	Ungeschützte Außenbauteile, die z. B. Niederschlägen, 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 nach Klasse WF häufiger oder langzeitiger Alkalizufuhr von außen ausgesetzt ist	Bauteile mit Meerwassereinwirkung; Bauteile unter Tausalzeinwirkung ohne zusätzliche hohe dynamische Beanspruchung (z. B. Spritzwasserbereiche, Fahr- und Stellflächen in Parkhäusern); Bauteile von Industriebauten und landwirtschaftlichen Bauwerken (z. B. Güllebehälter) mit Alkalisalzeinwirkungen; Betonfahrbahnen der Bauklassen IV - VI ¹⁾
WS	Beton, der hoher dynamischer Beanspruchung und direktem Alkalieintrag ausgesetzt ist	Bauteile unter Tausalzeinwirkung mit zusätzlicher hoher dynamischer Beanspruchung (z. B. Betonfahrbahnen der Bauklassen SV und I - III ¹⁾)

¹⁾ Bauklassen nach RStO; laut TL-Beton-StB 07

- Feuchtigkeitsklasse WO (trocken)
- Feuchtigkeitsklasse WF (feucht)
- Feuchtigkeitsklasse WA (feucht + Alkalizufuhr von außen)
- Feuchtigkeitsklasse WS (feucht + Alkalizufuhr von außen + starke dynamische Beanspruchung)

Die Tafeln 1, 2 und 3 enthalten eine Übersicht über die Expositions- und Feuchtigkeitsklassen. Aufgabe des Planers ist es, die zutreffenden Expositions- und Feuchtigkeitsklassen für die zu erwartenden Einwirkungen auf ein Bauteil zu bestimmen. Die Expositions- und Feuchtigkeitsklassen werden für die jeweilige Betonoberfläche festgelegt. Für ein Bauteil können gleichzeitig mehrere Expositions- und eine Feuchtigkeitsklasse maßgebend sein. Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklassen an bewehrten Bauteilen aus dem Bereich des Wohnungsbaus und des Hoch- bzw. Ingenieurbaus sind in den Bildern 1 und 2 dargestellt.

Während bei einem Wohnhaus eine bewehrte Innenwand z. B. in die Expositionsklasse XC1 entsprechend Tafel 1 eingeordnet werden kann, sind für eine direkt bewitterte Außenwand mindestens zwei Expositionsklassen (XC4, XF1) zutreffend. Weitere Beispiele für die Zuordnung einzelner Betonbauteile aus verschiedenen Bereichen des Betonbaus sind im Bauteilkatalog [8] aufgeführt. In [9] werden durch den Normenausschuss Bau Auslegungsfragen zur DIN 1045-1, u. a. auch zu Expositionsklasseneinstufungen, behandelt.

Sinnvollerweise wird in der Festlegung des Betons aus jeder Expositionsklasse (XC, XD, XF usw.) nur die maßgebende Angriffsstufe aufgeführt. Wenn eine Wand zum Beispiel auf einer Seite einem Angriff gemäß XC3 ausgesetzt ist, auf anderen jedoch gemäß XC4, so ist in der Festlegung des Betons nur die Angabe erforderlich, die den stärkeren Angriff erklärt – in diesem Fall also XC4. Hierzu gibt es jedoch eine Ausnahme:

Da in DIN 1045-2, Tabelle F.3.1 „Anwendungsbereiche für Zemente“ [2], Zemente aufgeführt sind, die für die Angriffsklassen XC2, XD2 oder XS2 verwendet werden dürfen, nicht aber für die

Angriffsklassen XC1, XD1 oder XS1, benötigt der Betonhersteller bei gleichzeitigem Zutreffen die Angabe jeweils beider Expositionsklassen. Nur so kann die Verwendung eines nach Norm für den speziellen Anwendungsbereich nicht zugelassenen Zements sicher ausgeschlossen werden. In den nachstehenden drei Fällen ist es daher erforderlich, wenn zutreffend, zwei Angriffsklassen aus einer Expositionsklasse in der Festlegung aufzuführen:

1. maßgebend: XC2, weiterhin zutreffend: XC1
2. maßgebend: XD2, weiterhin zutreffend: XD1
3. maßgebend: XS2, weiterhin zutreffend: XS1

Mit der Festlegung der maßgebenden Expositionsklassen für ein Bauteil ist hinsichtlich der Dauerhaftigkeit eine Betonzusammensetzung verbunden, die bestimmten Anforderungen genügen muss. Diese werden vorrangig durch den höchstzulässigen Wasserzementwert charakterisiert, der für Normal- und Schwerbeton eine erforderliche Mindestdruckfestigkeit nach sich zieht. Der Planer hat neben den übrigen Anforderungen bei der Bemessung die sich aus den Expositionsklassen ergebende Mindestdruckfestigkeitsklasse einzuhalten, sofern sich aufgrund der statischen Anforderungen keine höhere Druckfestigkeitsklasse ergibt. Für unbedeckte Stahlbetonaußenwände einer Garage (XC4, XF1) ergibt sich daher z. B. die Mindestdruckfestigkeitsklasse nach Expositionsklassen zu $f_{ck} \geq C25/30$.

■ 3 Anforderungen an die Überwachung

Mit zunehmenden Anforderungen an den Beton steigt auch das Risiko, dass durch Unzulänglichkeiten bei der Herstellung und Verarbeitung Abweichungen von der angestrebten Betonqualität auftreten. Aus diesem Grund definiert DIN 1045-3 [12] in Abhängigkeit von der Druckfestigkeitsklasse, der Expositionsklasse und weiterer besonderer Betoneigenschaften unterschiedliche Anforderungen an die Überwachung der Betone. Unterschieden wird in die Überwachungsklasse 1 (ÜK 1) für Betone mit relativ geringen Anforderungen, die ÜK 2 für Betone mit höheren Anforderungen und ÜK 3 für hochfeste Betone. Die genauen Einteil-

Tafel 4: Überwachungsklassen für Beton [2]

	Überwachungsklasse		
	1	2 ¹⁾	3 ¹⁾
Festigkeitsklasse für Normal- und Schwerbeton	≤ C25/30 ²⁾	≥ C30/37 und ≤ C50/60	≥ C55/67
Festigkeitsklasse für Leichtbeton der Rohdichteklassen			
D1,0 - D1,4	nicht anwendbar	≤ LC25/28	≥ LC30/33
D1,6 - D2,0	≤ LC25/28	LC30/33 und LC35/38	≥ LC40/44
Expositionsklasse	X0, XC, XF1	XS, XD, XA, XM ³⁾ , ≥ XF2	–
Besondere Betoneigenschaften ⁴⁾	–	Beton für wasserundurchlässige Baukörper (z. B. Weiße Wannen) ⁵⁾ , Unterwasserbeton, Beton für hohe Gebrauchstemperaturen ≤ 250 °C, Strahlenschutzbeton (ausgenommen KKW)	–

¹⁾ Das Bauunternehmen muss über eine ständige Betonprüfstelle verfügen. Eigenüberwachung sowie Fremdüberwachung durch anerkannte Überwachungsstelle erforderlich.

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

³⁾ Gilt nicht für übliche Industrieböden.

⁴⁾ Für besondere Anwendungsfälle (z. B. verzögerter Beton, FD/FDE-Beton) sind die Richtlinien des DAfStb zu beachten.

⁵⁾ Beton mit hohem Wassereindringwiderstand darf in die Überwachungsklasse 1 eingeordnet werden, wenn der Baukörper maximal nur zeitweilig aufstauendem Sickerwasser ausgesetzt ist und wenn in der Projektbeschreibung nichts anderes festgelegt ist.

lungskriterien können Tafel 4 entnommen werden. Für die ÜK 1 reicht im Normalfall eine Überwachung durch das ausführende Bauunternehmen. Für ÜK 2 und ÜK 3 muss das Bauunternehmen über eine eigene oder längerfristig vertraglich gebundene ständige Betonprüfstelle verfügen. Zusätzlich ist beim Einbau von Beton nach ÜK 2 und ÜK 3 eine Überwachung durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle (Fremdüberwachung)

vorgeschrieben. Gemäß VOB, Teil C DIN 18331 [13] ist die Überwachung, die durch das Bauunternehmen, einschließlich seiner ständigen Betonprüfstelle, durchgeführt wird, in allen Überwachungsklassen eine Nebenleistung. Die Fremdüberwachung für die Überwachungsklassen 2 und 3 durch eine anerkannte Überwachungsstelle ist eine besondere Leistung, die gesondert auszuschreiben und zu vergüten ist.

Tafel 5: Grenzwerte für Betonzusammensetzung und Eigenschaften von Beton für die Expositionsklassen X0, XC, XD und XS [2]

Klasse	max w/z bzw. (w/z) _{eq}	min f _{ck} ¹⁾ [N/mm ²]	min z ²⁾ [kg/m ³]	min z ^{2) 3)} (bei Anrechnung von Zusatzstoffen) [kg/m ³]	min p (Mindestluftgehalt) [Vol.-%]	andere Anforderungen
kein Korrosions- oder Angriffsrisiko						
X0	–	C8/10 C12/15 für tragende Bauteile	–	–	–	–
Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung						
XC1	0,75	C16/20 ⁴⁾	240	240	–	–
XC2						
XC3	0,65	C20/25	260	240	–	–
XC4	0,60	C25/30	280	270	–	–
Bewehrungskorrosion durch Chloride						
XD1	0,55	C30/37 ⁵⁾	300	270	–	–
XD2	0,50	C35/45 ^{5) 6) 7)}	320 ⁶⁾	270	–	–
XD3	0,45	C35/45 ^{5) 7)}	320 ⁶⁾	270	–	–
Bewehrungskorrosion durch Chloride aus Meerwasser						
XS1	0,55	C30/37 ⁵⁾	300	270	–	–
XS2	0,50	C35/45 ^{5) 6) 7)}	320 ⁷⁾	270	–	–
XS3	0,45	C35/45 ^{5) 7)}	320 ⁷⁾	270	–	–

¹⁾ Mindestdruckfestigkeitsklasse (min f_{ck}) gilt nicht für Leichtbeton

²⁾ Bei 63 mm Größtkorn darf der Zementgehalt (min z) um 30 kg/m³ verringert werden. In diesem Fall darf Fußnote ⁷⁾ nicht angewendet werden.

³⁾ Für die Anrechnung von Zusatzstoffen sind die Bedingungen nach DIN 1045-2, 5.2.5, einzuhalten.

⁴⁾ Für Stahlfaserbetone nach DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [5] gilt für die Expositionsklassen XC1 und XC2 die Mindestdruckfestigkeitsklasse C20/25.

⁵⁾ Bei LP-Beton aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus Expositionsklasse XF eine Festigkeitsklasse niedriger. In diesem Fall darf Fußnote ⁶⁾ nicht angewendet werden.

⁶⁾ Bei langsam und sehr langsam erhärtenden Betonen (r < 0,30) eine Festigkeitsklasse niedriger. Die Druckfestigkeit zur Einteilung in die Festigkeitsklasse ist auch in diesem Fall an Probekörpern im Alter von 28 Tagen zu bestimmen. In diesem Fall darf Fußnote ⁵⁾ nicht angewendet werden.

⁷⁾ Nach DAfStb-Richtlinie Massive Bauteile (kleinste Bauteildicke 80 cm) sind kleinere Grenzwerte möglich.

Tafel 6: Grenzwerte für die Betonzusammensetzung und Eigenschaften von Beton für die Expositionsklassen XF, XM, XA [2]

Klasse	max w/z bzw. (w/z) _{eq}	min f _{ck} ¹⁾ [N/mm ²]	min z ²⁾ [kg/m ³]	min z ^{2) 3)} (bei Anrechnung von Zusatzstoffen) [kg/m ³]	min p (Mindestluftgehalt) [Vol.-%]	andere Anforderungen
Frostangriff mit und ohne Taumittel						
XF1	0,60	C25/30	280	270	–	F ₄ ⁴⁾
XF2	0,55 ⁵⁾	C25/30	300	270 ⁵⁾	6)	MS ₂₅ ⁴⁾
	0,50 ⁵⁾	C35/45 ^{7) 8)}	320 ⁸⁾	270 ⁵⁾	–	
XF3	0,55	C25/30	300	270	6)	F ₂ ⁴⁾
	0,50	C35/45 ^{7) 8)}	320 ⁸⁾	270	–	
XF4	0,50 ⁵⁾	C30/37	320 ⁸⁾	270 ⁵⁾	6) 9)	MS ₁₈ ⁴⁾
Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung¹⁰⁾						
XM1	0,55	C30/37 ¹¹⁾	300 ¹²⁾	270	–	–
XM2	0,55	C30/37 ^{11) 13)}	300 ¹²⁾	270	–	Betonoberflächen- behandlung ¹⁴⁾
	0,45	C35/45 ¹¹⁾	320 ¹²⁾	270	–	–
XM3	0,45	C35/45 ^{11) 13)}	320 ¹²⁾	270	–	Oberflächenvergütung z. B. mit Hartstoffen nach DIN 1100
Betonkorrosion durch aggressive chemische Umgebung						
XA1	0,60	C25/30	280	270	–	–
XA2	0,50	C35/45 ^{7) 8) 11)}	320 ⁸⁾	270	–	–
XA3 ¹⁵⁾	0,45	C35/45 ¹¹⁾	320	270	–	–

- ¹⁾ Mindestdruckfestigkeitsklasse (min f_{ck}) gilt nicht für Leichtbeton
- ²⁾ Bei 63 mm Größtkorn darf der Zementgehalt (min z) um 30 kg/m³ verringert werden.
- ³⁾ Für die Anrechnung von Zusatzstoffen sind die Bedingungen nach DIN 1045-2, 5.2.5. einzuhalten.
- ⁴⁾ Gesteinskörnungen mit Regelanforderungen und zusätzlich Widerstand gegen Frost bzw. Frost und Taumittel (siehe DIN EN 12620)
- ⁵⁾ Nur Anrechnung von Flugasche zulässig. Weitere Zusatzstoffe des Typs II dürfen zugesetzt, aber nicht auf den Zementgehalt oder den w/z-Wert angerechnet werden. Bei Zugabe von Flugasche und Silikastaub ist jegliche Anrechnung ausgeschlossen.
- ⁶⁾ Mittlerer Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau: Größtkorn 8 mm ≥ 5,5 Vol.-%; Größtkorn 16 mm ≥ 4,5 Vol.-%; Größtkorn 32 mm ≥ 4,0 Vol.-%; Größtkorn 63 mm ≥ 3,5 Vol.-%. Einzelwerte dürfen diese Werte um max. 0,5 Vol.-% unterschreiten.
- ⁷⁾ Bei langsam und sehr langsam erhärtenden Betonen (r < 0,30) eine Festigkeitsklasse niedriger. Die Druckfestigkeit zur Einteilung in die Festigkeitsklasse ist auch in diesem Fall an Probekörpern im Alter von 28 Tagen zu bestimmen. In diesem Fall darf Fußnote ¹¹⁾ nicht angewendet werden.
- ⁸⁾ Nach DAfStb-Richtlinie Massige Bauteile (kleinste Bauteildicke 80 cm) sind kleinere Grenzwerte möglich.
- ⁹⁾ Herstellung ohne Luftporen zulässig für erdfeuchten Beton mit w/z ≤ 0,40 sowie bei Anwendung von Zement CEM III/B für Meerwasserbauteile und Räumlerlaufbahnen mit erhöhtem Mindestzementgehalt. Für Meerwasserbauteile gilt: w/z ≤ 0,45, Mindestfestigkeitsklasse C35/45 und z ≥ 340 kg/m³; für Räumlerlaufbahnen gilt: w/z ≤ 0,35, Mindestfestigkeitsklasse C40/50 und z ≥ 360 kg/m³ unter Beachtung von DIN EN 12255-1/DIN 19569-2 Kläranlagen
- ¹⁰⁾ Es dürfen nur Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 unter Beachtung der Festlegungen von DIN 1045-2 verwendet werden (Regelanforderungen); sonst Opferbeton erforderlich.
- ¹¹⁾ Bei LP-Beton aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus Expositionsklasse XF eine Festigkeitsklasse niedriger. In diesem Fall darf Fußnote ⁷⁾ nicht angewendet werden.
- ¹²⁾ Höchstzementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht für hochfesten Beton
- ¹³⁾ Obwohl zulässig, Anwendung von LP-Beton nicht empfehlenswert
- ¹⁴⁾ Z. B. Vakuumieren mit nachfolgendem Flügelglätten
- ¹⁵⁾ Schutz des Betons erforderlich, ggf. besonderes Gutachten für Sonderlösung

Tafel 7: Definitionen von unterschiedlichen Angaben zur Betondeckung

Begriff	Definition
Betondeckung	– Abstand zwischen Betonoberfläche und Außenkante Stahl
Aufgabe	– Sicherung des Verbunds zwischen Bewehrung und Beton – Schutz der Bewehrung gegen Rosten – Schutz der Bewehrung gegen Brandeinwirkung
Anforderungen	– ausreichende Dicke und Dichte der Betondeckung – Einhaltung der Maße der Betondeckung für Normalbeton – Nennmaß = Mindestmaß + Vorhaltemaß $c_{nom} = c_{min} + \Delta c$ – Einhaltung des Verlegemaßes c _v , das sich aus den verschiedenen Nennmaßen ergibt
c _{min}	– Mindestmaß der Betondeckung – Kontrollmaß für das erhärtete Bauteil
Δc	– Vorhaltemaß der Betondeckung zur Gewährleistung von c _{min} im erhärteten Bauteil: Δc = 1,0 cm für Expositionsklasse XC1 Δc = 1,5 cm für Expositionsklasse XC2, XC3, XC4, XD, XS – Angabe auf Bewehrungszeichnung erforderlich
c _{nom}	– Nennmaß der Betondeckung – maßgebend für die Bemessung in der statischen Berechnung (Nutzhöhe d)
c _v	– Verlegemaß der Betondeckung ¹⁾ – Angabe auf Bewehrungszeichnung erforderlich – maßgebend für die durch Abstandhalter zu unterstützende Bewehrung, z. B. bei Bügeln in Balken ¹⁾

¹⁾ siehe Bild 3

■ 4 Anforderungen aus den Expositionsklassen

Aufbauend auf der Klasseneinteilung werden für die verschiedenen Expositionsklassen Anforderungen an die Zusammensetzung des Betons festgelegt. Die Tafeln 5 und 6 enthalten die Grenzwerte der Betonzusammensetzung, die der Betonhersteller auf der Grundlage der ihm vorgegebenen Expositionsklassen zu berücksichtigen hat. Im Wesentlichen sind nachfolgende Anforderungen zu erfüllen:

- maximaler Wasserzementwert (max w/z bzw. max (w/z)_{eq})
- Mindestzementgehalt (min z)
- Mindestdruckfestigkeitsklasse des Betons (min f_{ck})

Bei mehreren für ein Bauteil zutreffenden Expositionsklassen sind die jeweils schärfsten Anforderungen an die Betoneigenschaften maßgebend, so etwa der niedrigste geforderte w/z-Wert zusammen mit dem höchsten Mindestzementgehalt. Fallweise kommen besondere Anforderungen an Ausgangsstoffe, Betonoberfläche oder Luftgehalt des Frischbetons hinzu.

Wie bereits dargestellt, handelt es sich bei den Expositionsklassen XC (Karbonatisierung), XD (Chloride aus Taumitteln) und XS (Chloride aus Meerwasser) um Einwirkungen auf die Bewehrung, welche die Dauerhaftigkeit des Betons nicht unmittelbar beeinträchtigen. Der Beton hat bei diesen Expositionsklassen eine Schutzfunktion für die Bewehrung zu erfüllen. Um dieses zu gewährleisten, muss der Beton eine ausreichende Dichtigkeit aufweisen. Auch die Mindestdicke der Betondeckung richtet sich nach DIN 1045-1 [4] unter anderem nach diesen Expositionsklassen. Es wird unterschieden zwischen dem Mindestmaß, dem Nennmaß sowie dem Verlegemaß der Betondeckung. Die Definition dieser Begrifflichkeiten ergibt sich aus Tafel 7 und Bild 3. Die sich für die Expositionsklassen XC, XD und XS ergebenden Mindest- und Nennmaße der Betondeckung können Tafel 8 entnommen werden. Abweichend von den Werten aus Tafel 8 ist es in einigen Fällen erforderlich, eine Erhöhung der Betondeckung vorzusehen, während in anderen Fällen eine Verminderung zulässig ist. Genauere Informationen dazu können

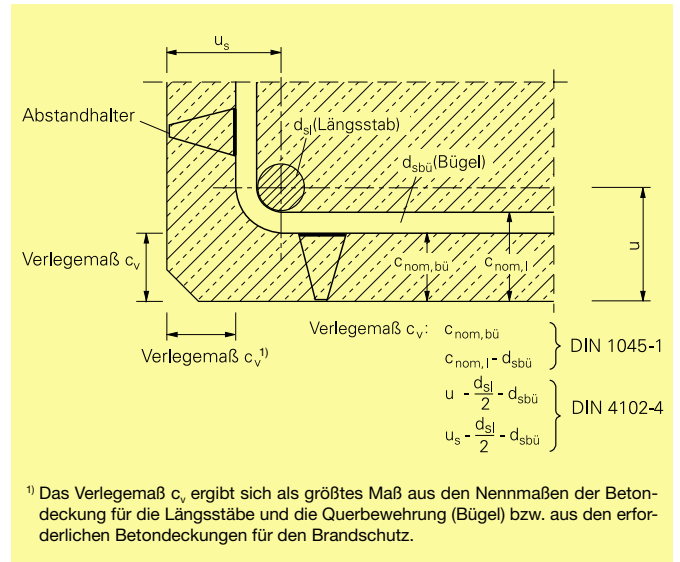


Bild 3: Grafische Darstellung von Nennmaß und Verlegemaß der Betondeckung

der Tafel 9 entnommen werden. Da die korrosiven Einwirkungen, die von chloridhaltigem Wasser ausgehen ähnlich sind, gleich ob es sich um Chloride aus Taumitteln (XD) oder aus Meerwasser (XS) handelt, ergeben sich auch die gleichen Anforderungen an die Betonzusammensetzung. Diese können Tafel 5 entnommen werden. Kriterien und Beispiele zur Einstufung von Bauteilen in die Expositionsklassen XC, XD und XS finden sich in Tafel 1. Bei der Planung von Schwimmbecken wird oft fälschlicherweise gechlortes Wasser (Wasseraufbereitung) mit chloridhaltigem Wasser gleichgesetzt. Gechlortes Wasser erfordert aber in der Regel keine Einstufung in eine Expositionsklasse XS oder XD [14]. Für Betonbauteile im Luftraum über gechlorten Schwimmbecken kann allerdings eine Einstufung nach XD1 und XA1 sinnvoll sein [15].

Für ein bewehrtes, tausalzbeanspruchtes Außenbauteil (z. B. Treppenpodest im Freien) bedeutet dies beispielsweise, dass entsprechend den hierbei zutreffenden Expositionsklassen XC4,

Tafel 8: Betondeckung der Bewehrung für Betonstahl in Abhängigkeit von der Expositionsklasse¹⁾

Expositionsklasse	Stabdurchmesser ²⁾ d_s [mm]	Mindestmaße c_{min} [cm]	Nennmaße c_{nom} [cm]
XC1	bis 10	1,0	2,0
	12, 14	1,5	2,5
	16, 20	2,0	3,0
	25	2,5	3,5
	28	3,0	4,0
	32	3,5	4,5
XC2, XC3	bis 20	2,0	3,5
	25	2,5	4,0
	28	3,0	4,5
	32	3,5	5,0
XC4	bis 25	2,5	4,0
	28	3,0	4,5
	32	3,5	5,0
XD1, XD2, XD3 ³⁾	bis 32	4,0	5,5
XS1, XS2, XS3	bis 32	4,0	5,5

¹⁾ Bei mehreren zutreffenden Expositionsklassen für ein Bauteil ist jeweils die Expositionsklasse mit der höchsten Anforderung maßgebend. Vergrößerung bzw. Verminderung der Betondeckung siehe Tafel 9.

²⁾ Bei Stabbündeln ist der Vergleichsdurchmesser d_{sv} maßgebend.

³⁾ Für XD3 können im Einzelfall zusätzlich besondere Maßnahmen zum Korrosionsschutz der Bewehrung notwendig sein.

Tafel 9: Erforderliche Vergrößerungen bzw. zulässige Verminderungen der Betondeckung

Vergrößerung der Betondeckung erforderlich bei:			Verminderung der Betondeckung zulässig bei:													
<ul style="list-style-type: none"> ■ Bauteilen aus Leichtbeton Zusätzlich gilt, dass c_{min} mindestens 0,5 cm größer sein muss als der Durchmesser der größten porigen leichten Gesteinskörnung, außer bei Expositionsklasse XC1. ■ Verschleißbeanspruchungen Alternativ zu zusätzlichen Anforderungen an die Gesteinskörnungen besteht die Möglichkeit, die Mindestbetondeckung der Bewehrung c_{min} zu vergrößern (Opferbeton): 			<ul style="list-style-type: none"> ■ Bauteilen mit hoher Betondruckfestigkeit f_{ck} Wenn f_{ck} um zwei Festigkeitsklassen höher liegt als nach Expositions-klassen-Einstufung mindestens erforderlich, um 0,5 cm Ausnahme: Abminderung für XC1 unzulässig ■ Bauteilen mit kraftschlüssiger Verbindung Fertigteil/Ortbeton $c_{min} \geq 0,5$ cm im Fertigteil; $c_{min} \geq 1,0$ cm im Ortbeton für die der Fuge zugewandten Ränder Bei Nutzung der Bewehrung im Bauzustand gelten jedoch die Tafelwerte für c_{min}. ■ Entsprechender Qualitätskontrolle Bei Planung, Entwurf, Herstellung und Bauausführung (entsprechend DBV-Merkblatt Betondeckung und Bewehrung) sind Abminderungen zulässig, i. d. R. um 0,5 cm. 													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Eigenschaften der Gesteinskörnung im Beton</th> <th>Expositions-klasse</th> <th>Vergrößerung Δc_{Opfer}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Normale Gesteinskörnung mit verminderten Anforderungen</td> <td>XM1</td> <td>+0,5 cm</td> </tr> <tr> <td>XM2</td> <td>+1,0 cm</td> </tr> <tr> <td>Keine Verwendung von Hartstoffen</td> <td>XM3</td> <td>+1,5 cm</td> </tr> </tbody> </table>			Eigenschaften der Gesteinskörnung im Beton	Expositions-klasse	Vergrößerung Δc_{Opfer}	Normale Gesteinskörnung mit verminderten Anforderungen	XM1	+0,5 cm	XM2	+1,0 cm	Keine Verwendung von Hartstoffen	XM3	+1,5 cm			
Eigenschaften der Gesteinskörnung im Beton	Expositions-klasse	Vergrößerung Δc_{Opfer}														
Normale Gesteinskörnung mit verminderten Anforderungen	XM1	+0,5 cm														
	XM2	+1,0 cm														
Keine Verwendung von Hartstoffen	XM3	+1,5 cm														
<ul style="list-style-type: none"> ■ Betonieren gegen unebene Flächen, Vorhaltemaß erhöhen <ul style="list-style-type: none"> - generell um das Differenzmaß der Unebenheit (z. B. bei architektonischer Gestaltung wie bei strukturierten Oberflächen, grobem Waschbeton), aber - Mindesthöhung um $\Delta c_{uneben} \geq + 2,0$ cm - bei Herstellung unmittelbar auf dem Baugrund um $\Delta c_{uneben} \geq + 5,0$ cm 																

XF4 und XD3 der Grenzwert für den äquivalenten w/z-Wert $(w/z)_{eq} \leq 0,45$ beträgt, ein Mindestzementgehalt von $z \geq 320$ kg/m³ sowie eine Mindestdruckfestigkeitsklasse C30/37 als Luftporenbeton einzuhalten sind.

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit sind für die einzelnen Expositions-klassen auch Regeln für die Verwendbarkeit von Zementen und Gesteinskörnungen zu beachten. Einzelheiten enthält [2] bzw. der Bauteilkatalog [8].

Für massige Bauteile (kleinste Bauteilabmessung ≥ 80 cm) gelten weitergehende Anforderungen nach der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [16], vgl. auch Zementmerkblatt „Massige Bauteile aus Beton“ B11 [17].

Für (Infrastruktur-)Bauwerke im Geltungsbereich der ZTV-ING [18], der ZTV Beton-Stb 07 [19] und der ZTV-W LB 215 [20] gelten zum Teil abweichende Regelungen, sowohl im Hinblick auf die Einstufung in Expositions-klassen als auch auf die resultierenden Anforderungen an den Beton und seine Ausgangsstoffe. Auf diese besonderen Regelungen wird in diesem Merkblatt nicht eingegangen.

5.1 Betonangriff durch Frost

Dem Frischbeton wird zum Erreichen der erforderlichen Verarbeitbarkeit im Allgemeinen mehr Wasser zugegeben als für die Hydratation des Zements erforderlich ist. Dieses Überschusswasser hinterlässt später im erhärteten Beton ein System haarfeiner Poren (Kapillarporen). Wenn Wasser in den Poren des Betons bei einem Frostangriff ganz oder teilweise gefriert, kann das entstehende Eis einen Druck auf die Porenwandungen bewirken, der bei nicht sachgerecht zusammengesetztem Beton ggf. zur Zerstörung des Betongefüges führt. Bei zusätzlichem Einwirken von Taumitteln kann diese Beanspruchung wesentlich verstärkt werden. Die Frosteinwirkungen werden durch die Expositions-klassen XF erfasst. Anforderungen an die Beton-zusammensetzung für diese Beanspruchungen sind in Tafel 6

festgelegt. Beispiele für gefährdete Betonflächen und deren Einstufung enthält Tafel 2.

Wenn ein Mindestgehalt an wirksamen Luftporen gemäß Tafel 6, Fußnote 6 im Beton (Luftporenbeton) gefordert ist, wird dem Frischbeton ein Luftporenbildner (LP) zugegeben. Die Überprüfung dieser Maßnahme erfolgt für Normal- und Schwerbeton auf der Baustelle am Frischbeton nach DIN EN 12350-7 [21] zu Beginn jedes Betonierabschnitts sowie zusätzlich in Zweifelsfällen. Für sehr weiche bis fließfähige Betone (Ausbreitmaßklasse $\geq F4$) kann es sinnvoll sein, den Mindestluftgehalt nach Tafel 6, Fußnote 6 um 1 Vol.-% zu erhöhen. Entsprechende Hinweise gibt z. B. das Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) [22].

Für Betone der Expositions-klassen XF müssen die verwendeten Gesteinskörnungen über die Regelanforderungen hinaus zusätzlich den Widerstand gegen Frost (F4, F2) bzw. Frost und Taumittel (MS25, MS18) entsprechend DIN EN 12620 [23] erfüllen.

LP-Betone der Expositions-klasse XF4 sollten erst dann einer Taumittelinwirkung ausgesetzt werden, wenn der Beton ausreichend erhärtet ist.

5.2 Betonangriff durch aggressive chemische Umgebung

Beton kann durch bestimmte Stoffe einem chemischen Angriff unterliegen. Die Widerstandsfähigkeit des Betons gegen chemische Angriffe setzt eine hohe Dichtigkeit und gegebenenfalls eine entsprechende Auswahl der Ausgangsstoffe voraus. Das Angriffsvermögen von weichen Wässern ist bei Betonen gering. Beton angreifend wirken Wässer und Böden, die z. B. freie Säuren, Sulfate, bestimmte Magnesium- oder Ammoniumsalze oder bestimmte organische Verbindungen in hinreichend hoher Konzentration enthalten. Ein chemischer Angriff ist in der Regel nur in Verbindung mit Feuchtigkeit möglich. Natürliche Wässer können Beton angreifende Stoffe enthalten (z. B. Moor-

wasser). Solche Wässer lassen sich oft an abgedehnten Salzen, dunkler Färbung, fauligem Geruch oder aufsteigenden Gasblasen erkennen. Beton angreifende Bestandteile in Böden sind überwiegend Säuren und Sulfate. Mit einem Säureangriff ist vor allem bei dunkel gefärbten, humusreichen Böden zu rechnen. Leicht lösliche Sulfate kommen insbesondere in der Umgebung von Salzstöcken, aber auch in organischen Böden vor. Im Bereich von Aufschüttungen industrieller Abfallprodukte ist eine gesonderte Beurteilung durch einen Fachmann notwendig. Gase können in trockenen Beton eindringen und mit dem Porenwasser Beton angreifende Lösungen bilden.

Je nach der Wirkungsweise der Beton angreifenden Stoffe unterscheidet man treibenden und lösenden Angriff. Treiben wird in erster Linie durch in Wasser gelöste Sulfate hervorgerufen, die mit bestimmten Bestandteilen des Zementsteins reagieren. Hiermit verbunden ist eine Volumenvergrößerung, die eine Schädigung des Betongefüges bewirken kann. Lösende Angriffe, die Kalkverbindungen aus dem Zementstein herauslösen, können durch Säuren, austauschfähige Salze sowie durch pflanzliche oder tierische Fette und Öle verursacht werden. Dabei wird die Oberfläche des Betons meistens langsam abgetragen.

Untersuchungen zur Beurteilung des chemischen Angriffs von Wässern und/oder Böden sowie nutzungsbedingten chemischen Einwirkungen sollten bereits frühzeitig bei der Planung einer Baumaßnahme erfolgen, um die evtl. notwendigen betontechnologischen und konstruktiven Maßnahmen rechtzeitig darauf abstimmen zu können. Tafel 10 enthält die Grenzwerte für die Beurteilung chemisch angreifender Grundwässer und Böden bei natürlicher Zusammensetzung und der Voraussetzung einer höchstens sehr geringen Fließgeschwindigkeit sowie mäßiger Temperatur. Aufgrund entsprechender Grundwasser- bzw. Bodenanalysen kann eine Einstufung in die Expositionsklassen XA1, XA2 oder XA3 erfolgen. Die Anforderungen an die Betonzusammensetzung ergeben sich dann nach Tafel 6. Da sich die einschlägigen Normen DIN EN 206-1 [1] bzw. DIN 4030-1 [24] fast ausschließlich auf natürliche Umgebungsbedingungen

beziehen, muss das Einwirken von chemischen Stoffen, die in diesen Normen nicht genannt werden, im Einzelfall bewertet werden. Hilfestellung gibt z. B. [25].

Betontechnologisch vorteilhaft sind bei chemischem Angriff Gesteinskörnungsgemische, die bei möglichst geringem Wasseranspruch eine hohe Packungsdichte ermöglichen. Für eine gute Verarbeitung und ein geschlossenes Gefüge des Betons ist ein ausreichender Mehlkorngehalt erforderlich.

Werden Betone aufgrund erhöhter Sulfatkonzentrationen in die Expositionsklassen XA2 oder XA3 eingestuft, ist die gemessene Sulfatkonzentration stets mit anzugeben, da in Abhängigkeit der Sulfatkonzentration ggf. HS- bzw. SR-Zemente oder Zement-Flugasche-Gemische eingesetzt werden müssen. Die Betonhersteller benötigen daher den Messwert der Sulfatkonzentration, um eine geeignete Betonzusammensetzung festzulegen.

Beton für die Expositionsklasse XA3 muss zusätzlich vor unmittelbarem Kontakt mit den angreifenden Stoffen geschützt werden, wenn nicht durch ein Gutachten die Eignung einer anderen Lösung nachgewiesen wird. Als Schutzmaßnahmen kommen Schutzschichten (Anstriche, Beschichtungen) oder dauerhafte Bekleidungen in Frage (Dichtungsbahnen aus Kunststofffolien oder aus getränkten bzw. beschichteten Pappen, Plattenverkleidungen). Für spezielle Bauwerke, z. B. landwirtschaftliche Silos, gibt es z. T. abweichende Regelungen.

5.3 Betonangriff durch Verschleißbeanspruchung

Verschleißbeanspruchung kann durch schleifenden und rollenden Verkehr (z. B. auf Fahrbahnen, Hallenböden), durch rutschendes Schüttgut (z. B. in Silos), durch regelmäßige, stoßartige Bewegung von schweren Gegenständen (z. B. in Werkstätten, auf Verladerampen) oder durch stark strömendes und Feststoffe führendes Wasser (z. B. in Tosbecken, Geschieberinnen) hervorgerufen werden. Diese Beanspruchungen können bei Betonen ohne ausreichenden Verschleißwiderstand zu einem erhöhten gleichmäßigen Oberflächenabtrag oder auch zu örtlich begrenztem Materialverlust an der Betonoberfläche führen.

Tafel 10: Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser¹⁾²⁾ [1, 2, 24]

Chemisches Merkmal	XA1 (schwach angreifend)	XA2 (mäßig angreifend)	XA3 (stark angreifend)
Grundwasser			
pH-Wert	6,5...5,5	< 5,5...4,5	< 4,5 und ≥ 4,0
kalklösende Kohlensäure (CO ₂) [mg/l]	15...40	> 40...100	> 100 bis zur Sättigung
Ammonium ³⁾ (NH ₄ ⁺) [mg/l]	15...30	> 30...60	> 60...100
Magnesium (Mg ²⁺) [mg/l]	300...1 000	> 1 000...3 000	> 3 000 bis zur Sättigung
Sulfat ⁴⁾ (SO ₄ ²⁻) [mg/l]	200...600	> 600...3 000	> 3 000 und ≤ 6 000
Boden			
Sulfat ⁵⁾ (SO ₄ ²⁻) [mg/kg] insgesamt	2 000...3 000 ⁶⁾	> 3 000 ⁶⁾ ...12 000	> 12 000 und ≤ 24 000
Säuregrad	> 200 Bauman-Gully	in der Praxis nicht anzutreffen	

¹⁾ Werte gültig für Wassertemperatur zwischen 5 °C und 25 °C sowie bei sehr geringer Fließgeschwindigkeit (näherungsweise wie für hydrostatische Bedingungen)

²⁾ Der schärfste Wert für jedes einzelne Merkmal ist maßgebend. Liegen zwei oder mehrere angreifende Merkmale in derselben Klasse, davon mindestens eines im oberen Viertel (bei pH im unteren Viertel), ist die Umgebung der nächsthöheren Klasse zuzuordnen. Ausnahme: Nachweis über eine spezielle Studie, dass dies nicht erforderlich ist.

³⁾ Gülle darf, unabhängig vom NH₄⁺-Gehalt, in Expositionsklasse XA1 eingeordnet werden.

⁴⁾ Sulfatgehalte oberhalb 600 mg/l sind im Rahmen der Festlegung des Betons anzugeben. Bei chemischen Angriffen durch Sulfat (ausgenommen bei Meerwasser) für Expositionsklasse XA2 und XA3 Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement) erforderlich. Für SO₄²⁻ ≤ 1 500 mg/l anstelle HS-Zement eine Mischung aus Zement und Flugasche zulässig.

⁵⁾ Tonböden mit einer Durchlässigkeit ≤ 10⁻⁵ m/s dürfen in eine niedrigere Klasse eingestuft werden.

⁶⁾ Falls die Gefahr der Anhäufung von Sulfationen im Boden – zurückzuführen auf wechselndes Trocknen und Durchfeuchten oder kapillares Saugen – besteht, ist der Grenzwert von 3 000 mg/kg auf 2 000 mg/kg zu vermindern.

Tafel 11: Alkaliempfindlichkeitsklassen für Gesteinskörnungen [7]

Klasse ¹⁾	Gesteinskörnung	Einstufung
E I-O	Opalsandstein einschließlich Kieselkreide	unbedenklich
E II-O		bedingt brauchbar
E III-O		bedenklich
E I-OF	Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint	unbedenklich
E II-OF		bedingt brauchbar
E III-OF		bedenklich
E I-S	gebrochene Grauwacke; gebrochener Quarzporphyr (Rhyolith); gebrochener Oberrhein-Kies; rezyklierte Körnungen; Kies mit mehr als 10 M.-% der vorgenannten Körnungen; andere gebrochene, nicht als <i>unbedenklich</i> eingestufte Gesteinskörnungen; andere gebrochene Gesteinskörnungen <i>ohne baupraktische</i> Erfahrungen	unbedenklich
E III-S		bedenklich
E I	Gesteinskörnungen, die nicht aus den Gewinnungsgebieten nach Teil 2 der Alkali-Richtlinie stammen oder zu den genannten alkaliempfindlichen Körnungen gehören und bei denen es unter baupraktischen Bedingungen zu keiner schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion gekommen ist	unbedenklich

¹⁾ Ist keine Klasse angegeben, so ist E III anzunehmen.

Insbesondere feinkörnige Bestandteile können in Abhängigkeit von der Reibung und Rauigkeit der Kontaktflächen bei schleifender Beanspruchung herausgerissen werden.

Für tragende und aussteifende Betonböden wird die Verschleißbeanspruchung in DIN 1045 durch die Expositionsclassen XM geregelt (siehe Tafel 6). Je nach Intensität des zu erwartenden Verschleißes ergeben sich die Klassen XM1, XM2 oder XM3. Für vergleichbare Beanspruchungen der Oberfläche von Betonen, die nicht im Geltungsbereich der Norm liegen, kann eine Anlehnung an diese beton-technologischen Anforderungen für die Klassen XM ebenfalls sinnvoll sein.

Durch Fahrzeuge hervorgerufene rollende Beanspruchung tritt sowohl bei harter als auch bei weicher Bereifung auf. Durch Bremsen, Lenkbewegungen oder durch Schlupf zwischen Reifen und Betonoberfläche entsteht eine schleifende und reibende Beanspruchung. Bei weicher, insbesondere profilierter Bereifung wirkt durch die Verformung ein zusätzlicher Saugeffekt, bei harten Rädern ggf. ein zusätzlicher stoßender Angriff auf die Betonoberfläche. Die Folgen können von einem langsamen Materialabtrag durch Lösen feinsten Feststoffpartikel aus der Betonoberfläche bis zu Störungen des Gefüges und dem Lockern oder Herausbrechen einzelner Gesteinskörner reichen. Die richtige Einstufung in die Expositionsclassen XM1 bis XM3 muss auf Grundlage der Art und Intensität der mechanischen Belastung erfolgen. Anhaltspunkte dazu liefern die Beispiele aus Tafel 2. Bei sehr starkem mechanischem Verschleiß (XM3) ist eine Oberflächenvergütung z. B. durch eine Hartstoffschicht oder -einstreuung mit Hartstoffen nach DIN 1100 [11] erforderlich (siehe auch DIN 18560-7 [26] und Zementmerkleblatt B19 „Zementestriche“ [17]). In einigen Fällen kann bei Verschleiß-

beanspruchung auch eine Erhöhung der Betondeckung sinnvoll sein. Angaben dazu sind in Tafel 9 aufgeführt.

5.4 Schädigende Alkali-reaktion durch bedenkliche Gesteinskörnungen

In der Natur kommen unterschiedliche Gesteinskörnungen vor, die aufgrund ihrer Zusammensetzung und tektonischen Beanspruchung alkalireaktive Kieselsäuren enthalten können. Diese können Auslöser einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-reaktion (AKR) sein. Unter AKR versteht man die chemische Reaktion von Kieselsäure (SiO₂) aus der Gesteinskörnung und den in der Porenlösung enthaltenen Alkalihydroxiden (NaOH, KOH). Hierbei entsteht Alkali-Kieselsäure-Gel, welches unter Wasseraufnahme zu einer Volumenvergrößerung und dadurch zu Schädigungen im Betongefüge führt.

Je nach Verteilung, Art und Größe der reaktiven Gesteinskörnungen sind die Reaktionen unterschiedlich stark ausgeprägt. In Abhängigkeit von den Randbedingungen können Auftreten und Grad einer Schädigung auch zeitlich stark variieren. Mitunter führt eine AKR erst nach mehreren Jahren zu einem Schaden.

Darüber hinaus beeinflussen auch feuchte Umgebungsbedingungen, eine Alkalizufuhr von außen oder eine zusätzliche starke dynamische Belastung das Schädigungspotenzial durch AKR. Letzteres spielt allerdings bei den allermeisten Bauaufgaben keine Rolle und tritt höchstens bei hochbelasteten Straßen oder Fundamenten von Offshore-Windkraftanlagen auf.

Die maßgebenden Einflussfaktoren zur Festlegung der Feuchtigkeitsclassen sind in der linken Spalte der Tafel 3 zusammen-

Tafel 12: Geforderte charakteristische Werte des Alkaligehalts ¹⁾ von Fahrbahndeckenzement für den Straßenbau (Bauklasse SV und I bis III RStO) [28]

Zementart	Hüttensandgehalt [M.-%]	Alkaligehalt des Zements [M.-% Na ₂ O-Äquivalent]	Alkaligehalt des Zements ohne Hüttensand bzw. Ölschiefer [M.-% Na ₂ O-Äquivalent]
CEM I + CEM II/A	–	≤ 0,80	–
CEM II/B-T	–	–	≤ 0,90
CEM II/B-S	21 ... 29	–	≤ 0,90
CEM II/B-S	30 ... 35	–	≤ 1,00
CEM III/A	36 ... 50	–	≤ 1,05

¹⁾ Nach Alkali-Richtlinie des DAfStb (Ausgabe Februar 2007) für dynamisch hoch beanspruchte Bauteile der Feuchtigkeitsclassen WS

Tafel 13: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton [1]

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt [kg/m ³]	Feuchtigkeitsklasse ¹⁾ und zugehörige Maßnahmen			
		WO	WF	WA	WS
E I; E I-S	ohne Festlegung	–	–	–	Fahrbahndeckenzement ⁵⁾
E I-O	≤ 330 ²⁾	–	–	–	Fahrbahndeckenzement ⁵⁾
E II-O		–	–	NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung Fahrbahndeckenzement ⁵⁾
E III-O		–	NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung	
E I-OF	> 330 ³⁾	–	–	–	Fahrbahndeckenzement ⁵⁾
E II-OF		–	NA-Zement	NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung Fahrbahndeckenzement ⁵⁾
E III-OF		–	NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung	
E III-S	≤ 300	–	–	–	Fahrbahndeckenzement ⁵⁾
	300 < z ≤ 350	–	–	NA-Zement ⁴⁾	Austausch der Gesteinskörnung ⁴⁾ Fahrbahndeckenzement ⁵⁾
	> 350	–	NA-Zement ⁴⁾	Austausch der Gesteinskörnung ⁴⁾	

¹⁾ Die Zuordnung von Umgebungsbedingungen zu den Feuchtigkeitsklassen siehe Tafel 3

²⁾ Bei z > 330 kg/m³ ist E I-OF bis E III-OF maßgebend.

³⁾ Bei z ≤ 330 kg/m³ ist E I-O bis E III-O maßgebend.

⁴⁾ Alternativ Gutachterlösung (zukünftig Performance-Prüfung nach Teil 4 der Alkali-Richtlinie)

⁵⁾ Zemente nach Tafel 12

mengefasst und bildeten die Basis für die Definition der o.g. Feuchtigkeitsklassen nach DIN 1045-2 bzw. Alkalirichtlinie [7]. Gleichzeitig stellen die Angaben der zweiten Spalte eine wesentliche Entscheidungshilfe für den Planer dar, da die aufgeführten Beispiele und Umgebungsbedingungen in den meisten Fällen die eindeutige Zuordnung eines Bauteils zu einer Feuchtigkeitsklasse zulassen. Die Zuordnung von massigen Bauteilen, z. B. von Fundamenten mit einer Dicke von über 80 cm, in die Feuchtigkeitsklasse WF ist in der Tatsache begründet, dass massige Bauteile unabhängig von den Umgebungsbedingungen auch nach langer Zeit nicht vollständig austrocknen.

Für die Betonzusammensetzung können sich je nach Feuchtigkeitsklasse und verwendeter Gesteinskörnung unterschiedliche Forderungen ergeben. Bei unbedenklichen Gesteinskörnungen (E I nach Alkalirichtlinie [7], vgl. Tafel 11) sind in der Regel keine weitergehenden Anforderungen einzuhalten. Bei bedenklichen Gesteinskörnungen (E II oder E III) sieht die Alkalirichtlinie unterschiedliche Maßnahmen vor, die von der Begrenzung des Zementgehalts über die Verwendung von Zementen mit höchst zulässigen Alkaligehalten (NA-Zemente nach DIN 1164-10 [27] bzw. spezielle Straßenbauzemente nach Tafel 12 [28]) bis hin zum Austausch der Gesteinskörnung reichen können. Eine Zusammenstellung dieser Forderungen ist in Tafel 13 dargestellt.

Literatur

- [1] DIN EN 206-1: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Ausgabe 2001-07 mit DIN EN 206-1/A1: 2004-10 und DIN EN 206-1/A2: 2005-09
- [2] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zur DIN EN 206-1; Ausgabe 2008-08
- [3] Grube, H.; Kerkhoff, B.: Die neuen deutschen Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 als Grundlage für die Planung dauerhafter Bauwerke. beton 51 (2001), H. 3, S. 173–177
- [4] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion; Ausgabe 2008-08

- [5] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton, Schlussentwurf Juli 2009 (2009-07-29)
- [6] Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN 4226. Heft 526, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 2003
- [7] DAfStb-Richtlinie – Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie) – Teil 1: Allgemeines, Teil 2: Gesteinskörnungen mit Opalsandstein und Flint, Teil 3: Gebrochene alkaliempfindliche Gesteinskörnungen; Ausgabe 2007-02
- [8] Bauteilkatalog: Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie, 6. Auflage 2009, Verlag Bau+Technik VBT, Düsseldorf 2009
- [9] Auslegungen zu DIN 1045-1. Normenausschuss Bau. Stand 12.05.2009 (aktuelle Fassung unter www.nabau.din.de)
- [10] Erläuterungen zu DIN 1045-1. Heft 525, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 2003 + Berichtigung 2005
- [11] DIN 1100: Hartstoffe für zementgebundene Hartstoffestriche – Anforderungen und Prüfverfahren; Ausgabe 2004-05
- [12] DIN 1045-3: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 3: Bauausführung; Ausgabe 2008-08
- [13] DIN 18331: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Betonarbeiten; Ausgabe 2006-10
- [14] Deutsche Gesellschaft für das Badewesen e.V.: Merkblatt Nr. 25.04: Schwimm- und Badebecken aus Stahlbeton. Ausgabe 2004, Bundesfachverband Öffentliche Bäder e.V., www.boeb.de
- [15] Freiman, T.; Müller, M.: Anforderungen an die Betontechnik und konstruktive Ausbildung von Schwimmbecken aus WU-Beton. Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 11, S. 842–857, 2006
- [16] DAfStb-Richtlinie – Massige Bauteile aus Beton; Ausgabe 2005-03
- [17] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zementmerkleblätter zu Betontechnik, Hochbau, Landwirtschaftlichem Bauen, Straßenbau und Tief- und Ingenieurbau. Stand 10.2009, aktuelle Fassungen unter www.vdz-online.de
- [18] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e.V., Köln
- [19] ZTV Beton-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Ausgabe 2007, Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e.V., Köln.
- [20] ZTV-W LB215: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215) Ausgabe 2004 einschließlich Änderung 1 2008-12. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Eisenbahnen, Wasserstraßen

- [21] DIN EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton. Teil 7: Luftgehalte; Druckverfahren; Ausgabe 2009-08
- [22] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e.V., Köln
- [23] DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton; Ausgabe 2008-07
- [24] DIN 4030-1: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte; Ausgabe 2008-06
- [25] Stoffe, die chemisch auf Beton einwirken. Cementbulletin 63 (1995) Heft 11. Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie (TFB), 1995
- [26] DIN 18560-7: Estriche im Bauwesen – Teil 7: Hochbeanspruchbare Estriche (Industrieestriche); Ausgabe 2004-04
- [27] DIN 1164-10: Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften; Ausgabe 2004-08
- [28] TL Beton-StB 07: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Ausgabe 2007, Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e.V., Köln
- [29] ZTV BEB-StB: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen – Betonbauweisen. Ausgabe 2002, Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e.V., Köln
- [30] Parkhäuser und Tiefgaragen. DBV-Merkblatt, Ausgabe 2005-01, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein, Berlin 2005

Beratung und Information zu allen Fragen der Betonanwendung

Regionale Ansprechpartner	www.beton.org
<p>BetonMarketing Nord GmbH Anderter Straße 99D, 30559 Hannover, Tel.: 0511 554707-0, Fax: 0511 554707-15, hannover@betonmarketing.de</p> <p>BetonMarketing Ost GmbH Teltower Damm 155, 14167 Berlin-Zehlendorf, Tel.: 030 3087778-0, Fax: 030 3087778-8, mailbox@bmo-berlin.de</p> <p>BetonMarketing Süd GmbH Gerhard-Koch-Straße 2+4, 73760 Ostfildern, Tel.: 0711 32732-200, Fax: 0711 32732-202, info@betonmarketing.de Büro München: Beethovenstraße 8, 80336 München, Tel.: 089 450984-0, Fax: 089 450984-45, info@betonmarketing.de</p> <p>BetonMarketing West GmbH Annastraße 3, 59269 Beckum, Tel.: 02521 8730-0, Fax: 02521 8730-29, info@bmwest.de</p>	
Herausgeber: Verein Deutscher Zementwerke e.V., Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf	www.vdz-online.de
Verfasser: Dr.-Ing. Jens Uwe Pott, BetonMarketing Nord GmbH, Dipl.-Ing. René Oesterheld, BetonMarketing Nord GmbH	