

Betonbauteile 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 EN 1992-1-1/ NA [5] 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.

Unter Einhaltung nationaler Erfahrungen entspricht die Anforderungskategorie S3 (siehe Tafel 12) einer Nutzungsdauer von 50 Jahren. Dabei wird vorausgesetzt, dass eine den Anwendungsregeln entsprechende Zusammensetzung des Betons nach DIN EN 206-1 und 1045-2 und eine Nachbehandlung nach DIN EN 13670 [14] und DIN 1045-3 NA [15] erfolgt.

■ 2 Betondruckfestigkeitsklassen

Die Festigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1 [4] beziehen sich auf die charakteristischen Zylinderdruckfestigkeiten f_{ck} , die an gesondert hergestellten Betonprüfkörpern nach definierter Lagerung im Alter von 28 Tagen ermittelt werden. Diese Vorgehensweise ist auf Betone bis zu einem Maximalwert C_{max} begrenzt. In DIN EN 1992-1-1 ist dieser empfohlene Wert C_{max} mit C90/105 angegeben. Darüber hinaus gibt es einen Hinweis auf landesspezifische Festlegungen, die dem Nationalen Anhang entnommen werden können. Der in Deutschland darin festgesetzte obere Wert beträgt C100/115, siehe Tafel 1.

Durch die vom Planer festzulegenden Expositionsklassen wird die Zusammensetzung des benötigten Betons in wesentlichen Zügen festgelegt. Neben der Festlegung eines maximalen w/z-Werts und eines Mindestzementgehalts werden bei Normal- und Schwerbetonen durch die Angabe der Expositionsklassen auch Forderungen an eine Mindestbetondruckfestigkeitsklasse gestellt. Man hat festgestellt, dass ein Zusammenhang zwischen dem w/z-Wert und der Druckfestigkeit besteht. Da der w/z-Wert ein Maß für die Qualität und die Dauerhaftigkeit eines Betons ist und sich

dieser am Festbeton nur mit hohem Aufwand nachweisen lässt, behilft man sich mit der Betondruckfestigkeit. Daher lässt sich die Dauerhaftigkeit bei Normal- und Schwerbeton über die Betondruckfestigkeit abschätzen. Zur Bestimmung und Klassifizierung werden die charakteristischen Festigkeiten an Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Länge von 300 mm ($f_{ck,cyl}$) oder an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge ($f_{ck,cube}$) im Prüfalter von 28 Tagen bestimmt.

Anders als beim Normal- und Schwerbeton kann beim Leichtbeton kein direkter Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit abgeleitet werden. Die Festigkeit des gefügedichten Leichtbetons wird neben der Festigkeit des Zementsteins bzw. dessen Dichtigkeit im Wesentlichen durch die Festigkeit der leichten Gesteinskörnung bestimmt. Deshalb können bei der Einstufung von Bauteilen aus Leichtbeton in die jeweiligen Expositionsklassen keine Mindestdruckfestigkeitsklassen abgeleitet bzw. Anforderungen daraus gestellt werden. Als Kriterium zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit gelten jedoch wie bei Normal- und Schwerbeton z. B. der Mindestzementgehalt und der Wasserzementwert. Gefügedichte Leichtbetone werden im Hinblick auf ihre Festigkeitsklassen unterteilt in Leichtbetone und hochfeste Leichtbetone, siehe Tafel 2. Die Zuordnung in Bezug auf die Einstufung in die jeweilige Überwachungskategorie erfolgt gemäß der vom Tragwerksplaner festgelegten Festigkeits- und Rohdichteklassen, siehe Tafel 6.

Tafel 1: Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwerbeton

Druckfestigkeitsklasse	$f_{ck,cyl}$ ¹⁾ [MPa]	$f_{ck,cube}$ ²⁾ [MPa]
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105 ³⁾	90	105
C100/115 ³⁾	100	115

¹⁾ $f_{ck,cyl}$ = charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern (Durchmesser 150 mm, Länge 300 mm, Alter 28 Tage, Wasserlagerung)

²⁾ $f_{ck,cube}$ = charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Würfeln (Kantenlänge 150 mm, Alter 28 Tage, Wasserlagerung)

³⁾ Druckfestigkeitsklassen C90/105 und C100/115: allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall erforderlich [2]

Tafel 2: Druckfestigkeitsklassen für gefügedichten Leichtbeton [6]

Druckfestigkeitsklasse	$f_{ck,cyl}$ ¹⁾ [MPa]	$f_{ck,cube}$ ^{2) 3)} [MPa]	Betonart
LC8/9	8	9	Leichtbeton
LC12/13	12	13	
LC16/18	16	18	
LC20/22	20	22	
LC25/28	25	28	
LC30/33	30	33	
LC35/38	35	38	
LC40/44	40	44	
LC45/50	45	50	
LC50/55	50	55	
LC55/60	55	60	Hochfester Leichtbeton
LC60/66	60	66	
LC70/77 ⁴⁾	70	77	
LC80/88 ⁴⁾	80	88	

¹⁾ $f_{ck,cyl}$ = charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern (Durchmesser 150 mm, Länge 300 mm, Alter 28 Tage, Wasserlagerung)
²⁾ $f_{ck,cube}$ = charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Würfeln (Kantenlänge 150 mm, Alter 28 Tage, Wasserlagerung)
³⁾ Es dürfen andere Werte verwendet werden, wenn das Verhältnis zwischen diesen und der Referenzfestigkeit von Zylindern mit genügender Genauigkeit nachgewiesen ist.
⁴⁾ Druckfestigkeitsklassen LC70/77 und LC80/88: allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall erforderlich [2].

3 Systematik der Expositionsklassen und der Feuchtigkeitsklassen

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. Im Eurocode 2 [4], [5] und in DIN 1045-2 [2] sind die Anforderungen an den Beton in Abhängigkeit von den möglichen korrosiven Einwirkungen durch Expositionsklassen festgelegt. Betonzusammensetzung, Mindestdruckfestigkeitsklassen, Rechenwerte der Rissbreite, Mindestbetondeckung der Bewehrung und Nachbehandlungsdauer werden den Expositionsklassen zugeordnet.

Für die Festlegung der Dauerhaftigkeit stehen insgesamt acht Expositionsklassen zur Verfügung, die jeweils in bis zu vier wei-

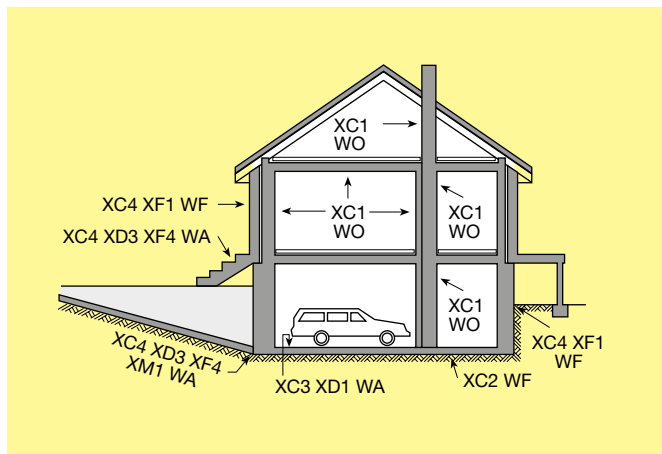


Bild 1: Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklassen an einem Wohnhaus

tere Unterklassen bzw. Angriffsstufen gegliedert sind. Im Weiteren müssen zusätzlich dazu auch die Feuchtigkeitsklassen festgelegt werden. Die dort getroffenen Anforderungen sollen eine eventuelle schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion verhindern.

Unterschieden werden Einwirkungen auf die Bewehrung und metallische Einbauteile im Beton (Bewehrungskorrosion) sowie auf den Beton selbst (Betonangriff). Darüber hinaus ist in jedem Fall auch eine Einstufung in eine Feuchtigkeitsklasse (WO, WF, WA) vorzunehmen. Hierbei ist zu beachten, dass die Feuchtigkeitsklasse WS im Hochbau keine Anwendung findet. Im Hinblick auf die Ausschreibung ist darauf zu achten, dass die richtige Einschätzung der am Gebäude vorliegenden Expositionen nicht grundsätzlich dadurch verbessert wird, indem die zutreffende Expositions- oder Feuchtigkeitsklasse um eine oder mehrere Stufen erhöht wird. Dies kann dazu führen, dass unter Umständen ein nachteiliger Effekt entsteht, die Baukosten dramatisch steigen oder gar eine fachgerechte Ausführung nicht möglich ist.

Besonders häufig trifft dies auf die Expositionsklasse XA zu. Bauteile, die aufgrund ihrer Beanspruchung in XA2 eingestuft werden müssten, aber dann in XA3 geplant werden, müssen folglich eine Auskleidung oder Beschichtung erhalten oder ggf. durch betontechnologische Maßnahmen konditioniert und durch einen Gutachter bewertet werden, vgl. Tafel 4.

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 Expositionsklasse 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

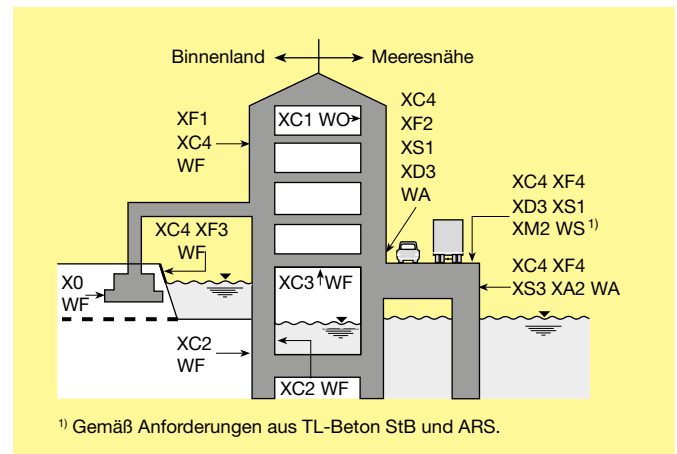


Bild 2: Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklassen im Hoch- und Ingenieurbau in Anlehnung an [3]

Stahlfasern ist daher nicht erforderlich und auch technisch nicht möglich. Dennoch sind auch Stahlfaserbetone ohne herkömmliche Bewehrung nach DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7] ggf. in die Expositionsklassen XC, XD und XS einzustufen, um weitere mit den Expositionsklassen verknüpfte Anforderungen, wie z. B. Mindestdruckfestigkeitsklassen oder Rissbreitenbe-

schränkungen, 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.

Tafel 3: Expositionsklassen (infolge von Umwelteinwirkungen) bezogen auf Bewehrungskorrosion, nach [2] und [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, 5].

²⁾ Für Stahlfaserbetone nach DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [7] 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 beim 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 [8]).

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

- Expositionsklasse XF (Freezing) – Beanspruchung durch Frost mit/ohne Taumittelnwirkung
- Expositionsklasse XA (Chemical Attack) – Beanspruchung durch chemische Angriffe

■ Expositionsklasse XM (Mechanical Abrasion) – Beanspruchung durch mechanischen Verschleiß

Seit 2008 wurden die gleichlautenden Tafeln der Expositionsklassen in DIN 1045-1, seit Mitte 2012 in DIN EN 1992-1-1/NA und 1045-2 um die so genannten Feuchtigkeitsklassen erweitert. Bei der Planung von Betonbauteilen sind neben den Expositi-

Tafel 4: Expositionsklassen (infolge von Umwelteinwirkungen) bezogen auf Betonangriff, nach [2] und [5]

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)	Mindestdruckfestigkeitsklasse 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 18 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 Verschleißbeanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luftberefte Fahrzeuge	C30/37 ⁶⁾
XM2	starke Verschleißbeanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummiberefte Gabelstapler	C35/45 ^{6) 8)}
XM3	sehr starke Verschleißbeanspruchung	tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch elastomer- oder stahlrollenberefte Gabelstapler	C35/45 ^{6) 9)}
		mit Kettenfahrzeugen häufig befahrene Oberflächen	
		Wasserbauwerke in geschiebelasteten Gewässern, z. B. Tosbecken	

¹⁾ Bei möglicher hoher Durchfeuchtung bei Frost ist die Einstufung in die Expositionsklasse XF3 zu prüfen.

²⁾ 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 beim Einsatz von Luftporenbeton ist nicht zulässig.

³⁾ Bei massigen Bauteilen eine Festigkeitsklasse 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 [12].

⁶⁾ 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.

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 Flügelglätten).

⁹⁾ Zusätzliche Oberflächenvergütung, z. B. durch Hartstoffe nach DIN 1100 [13], erforderlich.

Tafel 5: Feuchtigkeitsklassen für konstruktive Betonbauteile bezogen auf Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion [2]

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; Bauteile im Geltungsbereich der ZTV-ING [21]; Betonfahrbahnen der Belastungskategorie (Bk) 0,3 bis 1,0 [31]

onsklassen auch die Feuchtigkeitsklassen zu berücksichtigen. Diese sind aus der Alkali-Richtlinie [9] übernommen und definieren die Feuchtigkeitsbedingungen im Hinblick auf das Risiko einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Eine Ausnahme bildet die Feuchtigkeitsklasse WS. Eine Einstufung in die Feuchtigkeitsklasse WS wird vorrangig im Straßenbau vorgenommen und fällt nicht mehr in den Anwendungsbereich der Richtlinie.

- Feuchtigkeitsklasse WO (trocken)
- Feuchtigkeitsklasse WF (feucht)
- Feuchtigkeitsklasse WA (feucht + Alkalizufuhr von außen)

Die Tafeln 3, 4 und 5 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 [10] aufgeführt. In [11] werden durch den Normenausschuss Bau Auslegungsfragen zur DIN 1045-1 bzw. EC2, unter anderem auch zu Expositionsklasseneinstufungen, behandelt. Mit der Fortschreitung der europäischen Harmonisierung der Regelwerke werden im Normenausschuss Bau im DIN, auf der Grundlage der DIN 1045-1, die Auslegungen zum EC2 fortgeführt.

Sinnvollerweise wird in der Festlegung des Betons aus jeder Expositionsklasse (XC, XD, XF usw.) nur die maßgebende Angriffsstufe aufgeführt. Wenn eine Wand z. B. auf einer Seite ei-

nem Angriff gemäß XC3 ausgesetzt ist, auf der 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 zwei Ausnahmen:

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.

Zusätzlich, wie das Beispiel 1 zeigt, können an einem Bauteil unterschiedliche Klasseneinstufungen einer Exposition vorliegen. Dies betrifft sowohl den Tragwerksplaner als auch das bauausführende Unternehmen. Daher sind diese bei der Festlegung immer anzugeben und auf den Plänen fortzuführen und dem Betonhersteller mitzuteilen.

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 sind hinsichtlich der Dauerhaftigkeit Grenzen der 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 $f_{ck} = C25/30$.

■ 4 Anforderungen an die Überwachung in Abhängigkeit der Expositionsklassen

Mit zunehmenden Anforderungen an den Beton steigt auch die Bedeutung der sach- und fachgerechten Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung, um die angestrebte Betonqualität zielsicher zu erreichen. Aus diesem Grund definiert DIN EN 13670 [12] in Verbindung mit DIN 1045-3 [15] in Abhängigkeit von der Druckfestigkeitsklasse, der Expositionsklasse und weiteren besonderen Betoneigenschaften unterschiedliche An-

forderungen 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 Einteilungskriterien können Tafel 6 entnommen werden. Für die ÜK 1 reicht 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

Tafel 6: 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.

Tafel 7: 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 [7] 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 „Massige Bauteile“ (kleinste Bauteildicke 80 cm) sind kleinere Grenzwerte möglich.

dafür anerkannte Überwachungsstelle (Fremdüberwachung) vorgeschrieben. Gemäß VOB, Teil C DIN 18331 [16] 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.

■ 5 Baustoffliche und konstruktive Anforderungen aus den Expositionsclassen

5.1 Baustoffliche Anforderungen

Aufbauend auf der Klasseneinteilung werden für die verschiedenen Expositionsclassen Anforderungen an die Zusammensetzung des Betons festgelegt. Die Tafeln 7 und 8 enthalten die Grenzwerte der Betonzusammensetzung, die der Betonhersteller bei Betonen nach Eigenschaften auf der Grundlage der ihm vorgegebenen Expositionsclassen zu berücksichtigen hat. Bei Betonen nach Zusammensetzung ist hierfür der Verfasser der Festlegung verantwortlich. Im Wesentlichen sind nach-

folgende Anforderungen an die Grenzwerte der Betonzusammensetzung zu erfüllen:

- maximaler Wasserzementwert ($\max w/z$ bzw. $\max (w/z)_{eq}$)
- Mindestzementgehalt ($\min z$), mit und ohne Anrechnung von Betonzusatzstoffen
- Mindestdruckfestigkeitsklasse des Betons ($\min f_{ck}$)
- ggf. Mindestluftgehalt
- ggf. Eignung der Gesteinskörnung (bei Frost- und Frost-Taumiteleinwirkung)

Bei mehreren für ein Bauteil zutreffenden Expositionsclassen 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.

Für ein bewehrtes, tausalzbeanspruchtes Außenbauteil (z. B. Treppenpodest im Freien) bedeutet dies beispielsweise, dass entsprechend den hierbei zutreffenden Expositionsclassen XC4, XF4 und XD3 der Grenzwert für den äquivalenten w/z -Wert

Tafel 8: Grenzwerte für die Betonzusammensetzung und Eigenschaften von Beton für die Expositionsclassen 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 Verschleißbeanspruchung ¹⁰⁾						
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 \geq 5,5 Vol.-%; Größtkorn 16 mm \geq 4,5 Vol.-%; Größtkorn 32 mm \geq 4,0 Vol.-%; Größtkorn 63 mm \geq 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 $w/z \leq 0,40$ sowie bei Anwendung von Zement CEM III/B für Meerwasserbauteile und Räumlerlaufbahnen mit erhöhtem Mindestzementgehalt. Für Meerwasserbauteile gilt: $w/z \leq 0,45$, Mindestfestigkeitsklasse C35/45 und $z \geq 340$ kg/m³; für Räumlerlaufbahnen gilt: $w/z \leq 0,35$, Mindestfestigkeitsklasse C40/50 und $z \geq 360$ 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.

$(w/z)_{eq} = 0,45$ beträgt, ein Mindestzementgehalt von $z = 320 \text{ kg/m}^3$ sowie eine Mindestdruckfestigkeitsklasse C30/37 als Luftporrenbeton einzuhalten sind.

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit sind für die einzelnen Expositionsklassen auch Regeln für die Verwendbarkeit von Zementen und Gesteinskörnungen zu beachten. Einzelheiten enthält [2] bzw. der Bauteilkatalog [10]. Für massige Bauteile (kleinste Bauteilabmessung $\geq 80 \text{ cm}$) gelten weitergehende Anforderungen nach der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [19], vgl. auch Zement-Merkblatt „Massige Bauteile aus Beton“ B 11. Für (Infrastruktur-)Bauwerke im Geltungsbereich der ZTV-ING [21], der ZTV Beton-Stb 07 [22] und der ZTV-W LB 215 [23] gelten zum Teil abweichende Regelungen, sowohl im Hinblick auf die Einstufung in Expositionsklassen als auch auf die resultierenden Anforderungen an den Beton und seine Ausgangsstoffe. Auf diese besonderen Regelungen wird in diesem Merkblatt nicht eingegangen, hinsichtlich einer dauerhaften Bemessung sind ergänzende Regelwerke für den jeweiligen Anwendungsfall jedoch unbedingt zu beachten.

5.2 Anforderungen an die Betondeckung

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 dies zu gewährleisten, muss der Beton eine ausreichende Dichtigkeit aufweisen. Auch die Mindestdicke der Betondeckung richtet sich entsprechend DIN EN 1992-1-1 [4] unter anderem nach diesen Expositionsklassen und wird um die nationalen Regelungen in DIN EN 1992-1-1/NA [5] ergänzt.

Die grundlegenden Aufgaben der Betondeckung sind in Tafel 9 dargestellt. Daraus wird deutlich, dass neben reinen Dauerhaftigkeitsforderungen der Verbundzone von Stahl und Beton weitere wichtige Aufgaben zukommen.

Bei der Festlegung der Betondeckung wird unterschieden zwischen dem Nennmaß c_{nom} , dem Mindestmaß c_{min} und dem Vorhaltemaß Δc_{dev} der Betondeckung sowie dem Verlegemaß c_v der Bewehrung. Die Berechnung der erforderlichen Betondeckung nach dem EC2 setzt sich aus mehreren Einzelkriterien zusammen. Als Hilfe sind in Tafel 10 die aktuellen Formelzeichen den alten aus der DIN 1045-1 gegenübergestellt. In Tafel 11 finden sich die Einzelkriterien zur aktuellen Berechnung von c_{min} .

Grundsätzlich gilt weiterhin der bekannte Zusammenhang, dass für jeden Bewehrungsstab das Nennmaß der Betondeckung festzulegen ist, das sich aus Mindestmaß und Vorhaltemaß berechnet.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad \text{Gl. 1}$$

Am erhärteten Bauteil ist die Mindestbetondeckung c_{min} einzuhalten, die gewissermaßen das am fertigen Bauteil nachmessbare Kontrollmaß darstellt. Die Größe von c_{min} setzt sich grundsätzlich aus drei Einzelanforderungen zusammen. Einerseits aus dem Verbund zwischen Stahl und Beton, der bei einer zu geringen Betondeckung infolge unvollständiger Lastumlagerung zwischen Stahl und Beton nicht vollständig möglich ist. Andererseits aus der Dauerhaftigkeit, die durch eine ausreichend dichte Betonmatrix zwischen Stahl und Umgebungsbedingungen gewährleistet werden soll. Der jeweils höhere Wert aus den Einzelbedingungen ist maßgebend und darf unter Ausnutzung positiv wirkender Maßnahmen reduziert werden.

$$c_{min} = \{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\} \quad \text{Gl. 2}$$

Tafel 9: Definitionen zur Betondeckung

Begriff	Definition
Betondeckung	– Abstand zwischen Betonoberfläche und Außenkante Stahl
Aufgabe	– Sicherung des Verbunds zwischen Stahl und Beton – Schutz der Bewehrung vor Korrosion – Schutz der Bewehrung gegen Brandeinwirkung
Anforderungen	– ausreichende Dicke und Dichte der Betondeckung – Einhaltung der Maße der Betondeckung für Normalbeton

Tafel 10: Definitionen von Angaben und Anforderungen zur Betondeckung

Formelzeichen		Definition	Aufgabe
(alt) aus DIN 1045-1	(neu) aus EC2		
c_{nom}	c_{nom}	Nennmaß der Betondeckung	maßgebendes c_{nom} ergibt das Verlegemaß c_v und somit das Maß für die Abstandhalter
c_{min}	c_{min}	Mindestmaß der Betondeckung	am Bauteil nachweisbares Maß für den jeweiligen Stab
Δc	Δc_{dev}	Vorhaltemaß der Betondeckung	Vorhaltemaß der Betondeckung zur Gewährleistung von c_{min} im erhärteten Bauteil, ist immer auf der Bewehrungszeichnung anzugeben $\Delta c_{dev} = 1,0 \text{ cm}$ für Expositionsklasse XC1 $\Delta c_{dev} = 1,5 \text{ cm}$ für Expositionsklasse XC2, XC3, XC4, XD, XS
c_v	c_v (EC2/NA)	Verlegemaß der Bewehrung	tatsächliche Überdeckung zwischen Betonoberfläche und Außenkante des jeweiligen Stahls (Längs-, Querstab oder Bügel)

Tafel 11: Definitionen zur Berechnung des Mindestmaßes der Betondeckung

Formelzeichen aus EC2	Definition	Aufgabe
$c_{min,b}$	Mindestbetondeckung Verbund	Verbundsicherung („bond“) Φ_s bei Stabstahl
$c_{min,dur}$	Mindestbetondeckung Dauerhaftigkeit	Dauerhaftigkeit („durability“)
$\Delta c_{dur,\gamma}$	additives Sicherheitselement	in Deutschland (XD1, XS1: 10 mm), (XD2, XS2: 5 mm)
$\Delta c_{dur,st}$	Betondeckungsreduzierung	bei nichtrostenden Stählen („stainless rebars“)
$\Delta c_{dur,add}$	Betondeckungsreduzierung	$\Delta c_{dur,add} = 0$
Φ_s	Stabdurchmesser	Angabe des Stabdurchmessers oder Stabbündels $\Phi_n = \text{Vergleichs-} \Phi\text{-Stabbündel}$

Zu beachten ist jedoch, dass neben dem Dauerhaftigkeitskriterium c_{\min} auch das Verbundkriterium eingehalten wird ($c_{\min} \geq c_{\min,b}$).

Zur Erhaltung des bisherigen Sicherheitsniveaus und unter Beachtung der bisherigen guten Erfahrungen in der Betonherstellung und der Bauausführung ist entsprechend den Gegebenheiten in der Bundesrepublik Deutschland die Anforderungsklasse S3 nach EC2 [4] festgelegt worden. Dieses Qualitätsniveau ist in Deutschland für die Betonzusammensetzung nach DIN EN 206-1, DIN 1045-2 gegeben, Festigkeit und Dichtheit des Betons im oberflächennahen Bereich stellt die Nachbehandlung nach DIN 1045-3 bzw. DIN EN 13670 sicher. In der Summe entsprechen diese nationalen Erfahrungen der Anforderungsklasse S3 und gewährleisten eine Nutzungsdauer von 50 Jahren.

In Tafel 12 sind die Mindestbetondeckungen $c_{\min,dur}$ dargestellt. Um das bisherige deutsche Sicherheitsniveau zu erreichen, werden die nationalen Korrekturwerte $\Delta c_{dur,\gamma}$ genutzt, die in den Tafeln 13 und 14 abzulesen sind. Zu beachten ist, dass in anderen europäischen Ländern ebenfalls nationale Sonderwege beschränkt wurden. Einerseits liegt dies in der Wahl der Anforderungsklasse, andererseits in der Wahl mehrerer Anforderungsklassen in Abhängigkeit von der Exposition. In diesen Fällen sind unbedingt die jeweiligen nationalen Regelungen zu beachten.

Die Definition dieser Begrifflichkeiten ergibt sich aus den Tafeln 10, 11, 12 und Bild 3. Die sich für die Expositionsklassen XC, XD und XS ergebenden Mindest- und Nennmaße der Betondeckung können Tafel 16 entnommen werden. Abweichend von den Werten aus Tafel 16 ist es in einigen Fällen erforderlich, eine

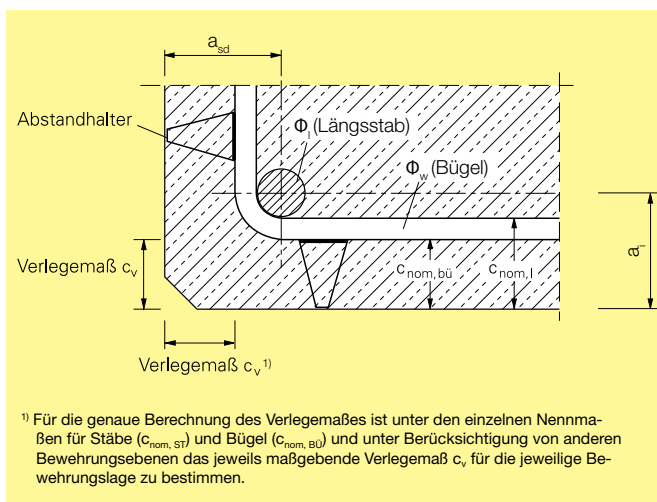


Bild 3: Grafische Darstellung von Nennmaß und Verlegemaß der Betondeckung

Erhöhung der Betondeckung vorzusehen, während in anderen Fällen eine Verminderung zulässig ist. Genauere Informationen dazu können der Tafel 17 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 7 entnommen werden. Kriterien und Beispiele zur Einstufung von Bauteilen in die Expositionsklassen XC, XD und XS finden sich in Tafel 3. 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 Expositi-

Tafel 12: Mindestbetondeckung $c_{\min,dur}$ Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Betonstahl [4]

Dauerhaftigkeitsanforderung für $c_{\min,dur}$ [mm]							
Anforderungsklasse	Expositionsklasse nach Tabelle 4.1 aus [4]						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Tafel 13: Additives Sicherheitselement $\Delta c_{dur,\gamma}$ für Betonstahl [5]

Dauerhaftigkeitsanforderung für $c_{\min,dur}$ [mm]							
Anforderungsklasse	Expositionsklasse nach Tabelle 4.1 aus [5]						
	(X0)	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S3 → $c_{\min,dur}$	(10)	10	20	25	30	35	40
$\Delta c_{dur,\gamma}$			0		+10	+5	0

Tafel 14: Additives Sicherheitselement $\Delta c_{dur,\gamma}$ für Spannglieder [5]

Dauerhaftigkeitsanforderung für $c_{\min,dur}$ [mm]							
Anforderungsklasse	Expositionsklasse nach Tabelle 4.1 aus [5]						
	(X0)	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S3 → $c_{\min,dur}$	(10)	20	30	35	40	45	50
$\Delta c_{dur,\gamma}$			0		+10	+5	0

Tafel 15: Maßgebende Größen zur Bestimmung des Verlegemaßes c_v

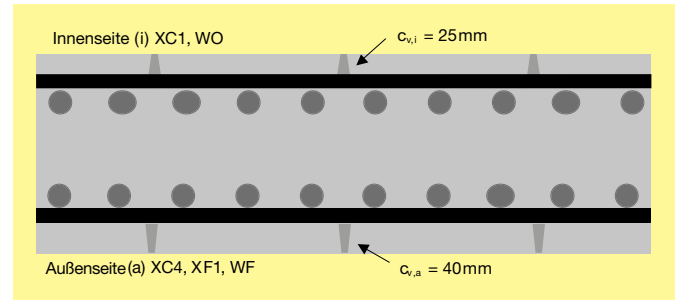
Verlegemaß c_v	$\left\{ \begin{array}{l} c_{nom,w} \\ c_{nom,l} - \Phi_w \\ a_i - \Phi/2 - \Phi_w \\ a_{sd} - \Phi/2 - \Phi_w \end{array} \right.$	DIN EN 1992-1-1
		DIN EN 1992-1-2 (Brandschutz)
		DIN EN 1992-1-2
		DIN EN 1992-1-2
a_i	Betondeckung im Brandfall von unten (eng. „immediate“)	DIN EN 1992-1-2
a_{sd}	Betondeckung im Brandfall von der Seite (eng. „sideways“)	DIN EN 1992-1-2

onsklasse XS oder XD [17]. Für Betonbauteile im Luftraum über gechlorten Schwimmbecken kann allerdings eine Einstufung nach XD1 und XA1 sinnvoll sein [18].

Beispiel 1 zeigt eine Außenwand, die keinerlei Anforderungen an den Wärmeschutz erbringen muss. Aufgrund der Nutzung ergibt sich für die Außenseite der Wand eine Einstufung in XC4, XF1, WF. Für die Innenseite ergibt sich eine Einstufung lediglich in XC1 und WO. Zwecks Bauteiloptimierung wird im Rahmen der Planung die Frage diskutiert, ob es sinnvoll ist, das Verlegemaß auf Außen- und Innenseite nach den jeweiligen Expositionsklassen anzupassen.

Für die Innenseite ergibt sich als Verlegemaß $c_{v,i} = 25$ mm, für die Außenseite $c_{v,a} = 40$ mm. Zu bemerken ist, dass sich das Verlegemaß auf der Außenseite maßgeblich durch das Nennmaß $c_{nom,QST,a} = 40$ mm infolge der Beanspruchung XC4 auf die Querbewehrung ergibt. Theoretisch wäre die Umsetzung auf diese Weise möglich, hinsichtlich der Ausführung in Ortbetonbauweise führen solche Optimierungen aber in der Regel zu Ausführungsproblemen auf der Baustelle, da z. B. zweierlei Größen an Abstandhaltern vorgehalten werden müssen. Im Bereich des Fertigteilbaus werden solche Varianten eher umgesetzt, hierbei sind weiterhin Abminderungen nach Tafel 17 möglich.

Beispiel 1: Ortbetonaußenwand C25/30, Querbewehrung Φ 10 mm, Längsbewehrung Φ 25 mm (ohne Anforderungen aus Brandschutz)



Innen (i)	
Längsstab (LST)	Querstab (QST)
$c_{nom,LST,i} = c_{min,LST,i} + \Delta c_{dev,LST,i}$	$c_{nom,QST,i} = c_{min,QST,i} + \Delta c_{dev,QST,i}$
$c_{nom,LST,i} = 25 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$	$c_{nom,QST,i} = 10 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$
$c_{v,i} = c_{nom,LST,i} - \Phi_{QST}$	
$c_{v,i} = 35 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 25 \text{ mm} > c_{nom,QST,i}$	
gew. $c_{v,i} = 25 \text{ mm}$	
Außen (a)	
Längsstab (LST)	Querstab (QST)
$c_{nom,LST,a} = c_{min,LST,a} + \Delta c_{dev,LST,a}$	$c_{nom,QST,a} = c_{min,QST,a} + \Delta c_{dev,QST,a}$
$c_{nom,LST,a} = 25 \text{ mm} + 15 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$	$c_{nom,QST,a} = 25 \text{ mm} + 15 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$
$c_{v,a} = c_{nom,QST,a} = 40 \text{ mm}; \text{maßgebend}$	

5.3 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 haarfiner 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

Tafel 16: Betondeckung der Bewehrung für die indikative Mindestfestigkeitsklasse ¹⁾ des Betons

Expositionsklasse	Festigkeitsklasse f_{ck}	Stabdurchmesser ²⁾ Φ bzw. Φ_n [mm]	Mindestmaß c_{min} [mm]	Vorhaltemaß Δc_{dev} [mm]	Nennmaß c_{nom} [mm]
XC1	$\geq C16/20$	bis 10	$c_{min,dur} = 10$	10	20
		12 - 14	$c_{min,b} = 12 - 14$	10	25
		16 - 20	$c_{min,b} = 16 - 20$	10	30
		25	$c_{min,b} = 25$	10	35
		28	$c_{min,b} = 28$	10	40
XC2 XC3	$\geq C16/20$ $\geq C20/25$	bis 20	$c_{min,dur} = 20$	15	35
		25	$c_{min,b} = 25$	10 ³⁾	35
		28	$c_{min,b} = 28$	10 ³⁾	40
		32	$c_{min,b} = 32$	10 ³⁾	45
XC4	$\geq C25/30$	bis 25	$c_{min,dur} = 25$	15	40
		28	$c_{min,b} = 28$	10 ³⁾	40
		32	$c_{min,b} = 32$	10 ³⁾	45
XD1, XS1	$\geq C30/37$ ⁵⁾	bis 32	$c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma}$ $= 40$	15	55
XD2, XS2	$\geq C35/45$ ⁵⁾				
XD3 ⁴⁾ , XS3	$\geq C35/45$ ⁵⁾				

¹⁾ Bei mehreren zutreffenden Expositionsklassen für ein Bauteil ist jeweils die Expositionsklasse mit der höchsten Anforderung maßgebend (indikative Mindestfestigkeitsklasse). Alle Angaben für Normalbeton bis max. Größtkorn 32 mm und ohne Berücksichtigung von Vorspannbewehrung. Ggf. zusätzliche Vergrößerung bzw. Verminderung der Betondeckung (siehe unten). Der Tafel liegt die Anforderungskategorie S3 für Deutschland zugrunde.
²⁾ Bei Stabbündeln ist anstelle Φ der Vergleichsdurchmesser Φ_n maßgebend.
³⁾ Da Verbundsicherung maßgeblich, hier nur mit $\Delta c_{dev} \geq 10$ mm nach DIN EN 1992-1-1, 4.4.1.2 (3)
⁴⁾ Für XD3 sind ggf. zusätzlich besondere Maßnahmen zum Korrosionsschutz der Bewehrung notwendig.
⁵⁾ Bei Luftporenbeton, z. B. wegen gleichzeitiger Expositionsklasse XF, eine Festigkeitsklasse niedriger.

Tafel 17: Erforderliche Vergrößerungen bzw. zulässige Verminderungen der Betondeckung

Vergrößerung der Betondeckung erforderlich bei:													
<p>■ Bauteilen aus gefügedichtem Leichtbeton Für Dauerhaftigkeit keine Erhöhung der Betonüberdeckung $c_{min,dur}$, sofern diese um mindestens 5 mm größer ist als der Durchmesser des porigen Größtkorns. Zur Sicherstellung des Verbundes ist die Mindestbetondeckung $c_{min,b}$ für die Verbundbedingungen um + 5 mm zu erhöhen. $c_{min} \geq$ (Größtkorn der leichten Gesteinskörnung) + 5 mm, außer bei Expositionsklasse XC1</p>													
<p>■ Verschleißbeanspruchungen Alternativ zu zusätzlichen Anforderungen an die Gesteinskörnung besteht die Möglichkeit die Mindestbetondeckung der Bewehrung zu vergrößern (Opferbeton), $c_{min} + \Delta c_{Opfer}$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Eigenschaften der Gesteinskörnung im Beton</th> <th>Expositionsklasse</th> <th>Vergrößerung Δc_{Opfer} [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">normale Gesteinskörnung mit verminderten Anforderungen</td> <td>XM1</td> <td>+5</td> </tr> <tr> <td>XM2</td> <td>+10</td> </tr> <tr> <td>keine Verwendung von Hartstoffen</td> <td>XM3</td> <td>+15</td> </tr> </tbody> </table>			Eigenschaften der Gesteinskörnung im Beton	Expositionsklasse	Vergrößerung Δc_{Opfer} [mm]	normale Gesteinskörnung mit verminderten Anforderungen	XM1	+5	XM2	+10	keine Verwendung von Hartstoffen	XM3	+15
Eigenschaften der Gesteinskörnung im Beton	Expositionsklasse	Vergrößerung Δc_{Opfer} [mm]											
normale Gesteinskörnung mit verminderten Anforderungen	XM1	+5											
	XM2	+10											
keine Verwendung von Hartstoffen	XM3	+15											
<p>■ Betonieren gegen unebene Flächen Vorhaltemaß Δc_{dev} erhöhen – generell um das Differenzmaß der Unebenheit – mindestens aber ≥ 20 mm – bei unebenem Baugrund ≥ 50 mm</p>													
<p>■ Nachträglicher Strukturierung der Oberflächen Vorhaltemaß Δc_{dev} mindestens um das Maß des Materialabtrags von der geschalteten Seite her erhöhen.</p>													
<p>■ Höheren Betondruckfestigkeiten Bei Betonfestigkeit ≥ 2 Festigkeitsklassen höher als die indikative Mindestbetondeckung nach Expositionsklassen notwendig, Verminderung von c_{min} um 5 mm zulässig (außer bei XC 1)</p>													
<p>■ Halbfertigteilen Bei Bauteilen mit kraftschlüssiger Verbindung Fertigteil/Ortbeton $c_{min} \geq 5$ mm im Fertigteil und $c_{min} \geq 10$ mm im Ortbeton für die der Verzahnungsfuge zugewandten Ränder Bei Nutzung der Bewehrung im Bauzustand gelten jedoch die Tafelwerte für c_{min}</p>													
<p>■ Qualitätskontrolle Bei entsprechender Qualitätskontrolle bei Planung, Entwurf, Herstellung und Bauausführung (entsprechend DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“) sind Abminderungen zulässig in der Regel um 5 mm</p>													

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 Expositionsklassen XF erfasst. Anforderungen an die Betonzusammensetzung für diese Beanspruchungen sind in Tafel 8 festgelegt. Beispiele für gefährdete Betonflächen und deren Einstufung enthält Tafel 2.

Wenn ein Mindestgehalt an wirksamen Luftporen gemäß Tafel 8, Fußnote 6 im Beton (Luftporenbeton) gefordert ist, wird dem Frischbeton ein Luftporenbildner (LP) zugegeben. Die Überprüfung dieser Maßnahme erfolgt für Normal- und Schwebeton auf der Baustelle am Frischbeton nach DIN EN 12350-7 [24] zu Beginn jedes Betonierabschnitts sowie zusätzlich in Zweifelsfällen. Für sehr weiche bis fließfähige Betone (Ausbreitmaßklasse = F4) kann es sinnvoll sein, den Mindestluftgehalt nach Tafel 8, 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) [25].

Für Betone der Expositionsklassen XF müssen die verwendeten Gesteinskörnungen über die Regelanforderungen hinaus zusätzlich den Widerstand gegen Frost (F_4 , F_2) bzw. Frost und Taumittel (MS_{25} , MS_{18}) entsprechend DIN EN 12620 [26] erfüllen.

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

5.4 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 ggf. 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. Auch natürliche Wässer können Beton angreifende Stoffe enthalten (z. B. Moorwasser). Solche Wässer lassen sich oft an abgeschiedenen 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 eventuell notwendigen betontechnologischen und konstruktiven Maßnahmen rechtzeitig darauf abstimmen zu können. Tafel 18 enthält die Grenzwerte für die Beurteilung chemisch angreifender Grundwässer und Böden bei natürlicher Zusammensetzung und der Voraussetzung einer höchstens sehr geringen Fließgeschwindigkeit sowie bei 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 8. Da sich die einschlägigen Normen DIN EN 206-1 [1] bzw. DIN 4030-1 [27] 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. [28].

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. 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 zum Teil abweichende Regelungen.

5.5 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.

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 1045-2 durch die Expositionsklassen XM geregelt (siehe Tafel 8). 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 betontechnologischen 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 Rei-

Tafel 18: Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser ^{1), 2)} [1], [2], [27]

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...1000	> 1000...3000	> 3000 bis zur Sättigung
Sulfat ⁴⁾ (SO ₄ ²⁻) [mg/l]	200...600	> 600...3000	> 3000 und ≤ 6000
Boden			
Sulfat ⁵⁾ (SO ₄ ²⁻) [mg/kg] insgesamt	2000...3000 ⁶⁾	> 3000 ⁶⁾ ...12000	> 12000 und ≤ 24000
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 (SR-Zement) erforderlich. Für SO₄²⁻ ≤ 1500 mg/l anstelle SR-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 3000 mg/kg auf 2000 mg/kg zu vermindern.

Tafel 19: Alkaliempfindlichkeitsklassen für Gesteinskörnungen [9]

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	Gesteinskörnungen d > 2 mm	unbedenklich
E III-S	<ul style="list-style-type: none"> - gebrochene Grauwacke, gebrochener Quarzporphyr (Rhyolith), gebrochener Oberrhein-Kies - rezyklierte Körnungen - Kies mit mehr als 10 M.-% der vorgenannten Körnungen - ungebrochene Gesteinskörnungen aus den Flussläufen und anderen Ablagerungsräumen in den Gebieten der Saale, Elbe, Mulde und Elster und im angrenzenden Bereich sowie aus diesen hergestellte gebrochene Gesteinskörnungen (Kiessplitte) 	bedenklich
E I	<p>Gesteinskörnungen d > 2mm</p> <ul style="list-style-type: none"> - die nicht aus dem eiszeitlichen Ablagerungsgebiet in Norddeutschland stammen und - die keinen Gesamtanteil < 2 M.-% oder einen Flintanteil mit einer Rohdichte > 2450 kg/m³ und einem Flintanteil ≤ 2 M.-% aufweisen und - die nicht zu den bei E I-S bzw. E III-S genannten Gesteinskörnungen gehören. <p>Gesteinskörnungen (d ≤ 2 mm) außerhalb des eiszeitlichen Ablagerungsgebiets in Norddeutschland</p>	unbedenklich

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

fen 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 ein. 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 Expositionsklassen XM1 bis XM3 muss auf Grundlage der Art und Intensität der mechanischen Belastung erfolgen. Anhaltspunkte dazu liefern die Beispiele aus Tafel 4. Bei sehr starkem mechanischem Verschleiß (XM3) ist eine Oberflächenvergütung z. B. durch eine Hartstoffschicht oder -einstreuung mit Hartstoffen nach DIN 1100 [13] erforderlich (siehe auch DIN 18560-7 [29] und Zement-Merkblatt B 19 „Zementestriche“ [20]). Bei der Ausführung der Expositionsklasse XM3 kann es durch den geringen w/z-Wert zu Ausführungsproblemen bei der Hartstoffeinstreuung kommen. Im Weiteren ist eine Kombination der Expositionsklassen XM3 und XF4, obwohl normgemäß, wegen der Einarbeitung von Hartstoffen in den LP-Beton nicht zu empfehlen, da das LP-System Nachteile beeinflusst wird. In einigen Fällen kann bei Verschleißbeanspruchung auch eine Erhöhung der Betondeckung sinnvoll sein. Angaben dazu sind in Tafel 17 aufgeführt.

5.6 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 amorphen, kryptokristallinen oder gittergestörten SiO₂-Mineralen aus der Gesteinskörnung und den in der Porenlösung enthaltenen Alkalihydroxiden (NaOH, KOH). Hierbei entsteht Alkali-Kieselsäure-Gel, welches unter Wasseraufnahme zu einer Volumenvergrößerung und entsprechenden Quelldrücken führt, die Schädigungen im Betongefüge zur Folge haben können.

Je nach Verteilung, Art und Größe der reaktiven Gesteinskörnungen können die Reaktionen unterschiedlich stark ausgeprägt sein. 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 eine AKR. Letzteres spielt allerdings bei den allermeisten Bauaufgaben keine Rolle und tritt höchstens bei hochbelasteten Straßen auf. Die dafür geltenden Regeln sind zurzeit allein dem Straßenbau zugeordnet. Im Nationalen Anhang des EC2 ist die Feuchtigkeitsklasse WS nicht vorgesehen.

Die maßgebenden Einflussfaktoren zur Festlegung der Feuchtigkeitsklassen sind in der linken Spalte der Tafel 5 zusammengefasst und bildeten die Basis für die Definition der o.g. Feuchtigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1 NA bzw. der Alkali-Richtlinie [9]. 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 geschuldet, 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 [9], vgl. Tafel 20) sind in der Regel keine weitergehenden Anforderungen einzuhalten. Bei bedenklichen Gesteinskörnungen (E II oder E III) sieht die Alkali-Richtlinie unterschiedliche Maßnahmen vor, die von der Begrenzung des

Tafel 20: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton [9]

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

¹⁾ Für die Zuordnung von Umgebungsbedingungen zu den Feuchtigkeitsklassen siehe Tafel 5.

²⁾ Für jede zu liefernde Korngruppe sind immer zwei gesonderte Einstufungen hinsichtlich Opalsandstein (O) allein und Opalsandstein gemeinsam mit Flint (OF) erforderlich.

³⁾ Keine Maßnahmen erforderlich.

⁴⁾ Alternativ gutachterliche Stellungnahme durch besonders fachkundige Person.

Zementgehalts über die Verwendung von Zementen mit höchstzulässigen Alkaligehalten (na)-Zemente bis hin zum Austausch der Gesteinskörnung reichen können. Die Anforderungen an die

technischen Eigenschaften, niedrigwirksamer Alkaligehalt, sind in der DIN 1164-10 [30] geregelt und als gesonderte Leistung der Hersteller zu erklären.

■ 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 EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Ausgabe 2011-01
- [5] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Ausgabe 2013-04; + A1:2015-12
- [6] Zement-Merkblatt B 13 „Leichtbeton“; Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.): Zement-Merkblätter Betontechnik, www.beton.org, 2014-06
- [7] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton, Ausgabe 2012-11
- [8] 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
- [9] DAfStb-Richtlinie – Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), 2013-10
- [10] Bauteilkatalog: Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie, 9. Auflage 2016, Verlag Bau+Technik, Erkrath 2016
- [11] Auslegungen zur DIN 1045-1, auch zu Expositionsklassen bei speziellen Anwendungsfällen, können auch für die Anwendung der DIN EN 1992-1-1 weiter genutzt werden. Sie sind komplett unter <http://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/auslegungen-zu-din-normendes-nabau-68630>, Auslegungen DIN 1045-1, Fassung Juni 2012 und Auslegungen zu DIN EN 1992-1-1, Fassung November 2015, zu finden.
- [12] Erläuterungen zu Eurocode 2: Heft 600, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 2012-09
- [13] DIN 1100: Hartstoffe für zementgebundene Hartstoffestriche – Anforderungen und Prüfverfahren; Ausgabe 2004-05
- [14] DIN EN 13670: Ausführung von Tragwerken aus Beton, 2011-03
- [15] DIN 1045-3: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN EN 13670; 2012-03
- [16] DIN 18331: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Betonarbeiten; Ausgabe 2016-10
- [17] Deutsche Gesellschaft für das Badewesen e. V.: Merkblatt Nr. 25.04: Schwimm- und Badebecken aus Stahlbeton. Ausgabe 01-2011, Bundesfachverband Öffentliche Bäder e. V., www.boeb.de
- [18] Freiman, T.; Müller, M.: Anforderungen an die Betontechnik und konstruktive Ausbildung von Schwimmbecken aus WU-Beton. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 11, S. 842–857
- [19] DAfStb-Richtlinie – „Massige Bauteile aus Beton“; Ausgabe 2010-04
- [20] Zement-Merkblatt B 19 „Zementestrich“; Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.): Zement-Merkblätter Betontechnik, www.beton.org, 2015-07
- [21] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e. V., Köln, Ausgabe 2014-12
- [22] ZTV Beton-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e. V., Köln, Ausgabe 04-2013
- [23] ZTV-W LB215: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215) Ausgabe 2012, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt
- [24] DIN EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalte; Druckverfahren; Ausgabe 2009-08
- [25] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e. V., Köln, 2004
- [26] DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton; Ausgabe 2008-07
- [27] DIN 4030-1: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte; Ausgabe 2008-06, DIN 4030/A1, Entwurf 2011-08
- [28] Stoffe, die chemisch auf Beton einwirken, Cementbulletin 63 (1995) Heft 11, Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie (TFB)
- [29] DIN 18560-7: Estriche im Bauwesen – Teil 7: Hochbeanspruchbare Estriche (Industriestriche); Ausgabe 2004-04
- [30] DIN 1164-10: Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften; Ausgabe 2013-03
- [31] TL Beton-StB 07 – Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton sowie Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013 (BMVBS)

Beratung und Information zu allen Fragen der Betonanwendung

Herausgeber

InformationsZentrum Beton GmbH, Steinhof 39, 40699 Erkrath

www.beton.org

Kontakt und Beratung vor Ort

Büro Berlin, Teltower Damm 155, 14167 Berlin, Tel.: 030 3087778-0, berlin@beton.org

Büro Hannover, Hannoversche Straße 21, 31319 Sehnde, Tel.: 05132 502099-0, hannover@beton.org

Büro Beckum, Neustraße 1, 59269 Beckum, Tel.: 02521 8730-0, beckum@beton.org

Büro Ostfildern, Gerhard-Koch-Straße 2+4, 73760 Ostfildern, Tel.: 0711 32732-200, ostfildern@beton.org

Verfasser

Dipl.-Ing. René Oesterheld, Dr.-Ing. Matthias Beck, InformationsZentrum Beton GmbH