

Dauerhaftigkeit von Beton – Konzepte heute und morgen insbesondere am Beispiel der Carbonatisierung; Teil 1

Christoph Müller und Sebastian Palm, Düsseldorf

Die Einführung leistungsbezogener Nachweise als Alternative zu den deskriptiven Regeln des Betonbaus kann eine sinnvolle Ergänzung darstellen. Das Regelwerk des Betonstraßenbaus z.B. sieht seit einigen Jahren zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion Performanceprüfungen der Betone vor. Ähnlich ist es bei Bahnschwellen aus Beton. In beiden Fällen leisten diese Konzepte gute Dienste: Seit ihrer Einführung werden Schäden sicher vermieden. Das ist ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Verwendung des Betons. In weiten Teilen des Betonbaus wird das Thema Dauerhaftigkeit derzeit dagegen durch deskriptive Regeln (maximaler Wasserzementwert, Mindestzementgehalt, Mindestdruckfestigkeitsklasse, Mindestbetondeckung) behandelt. Die nächste Ausgabe des Eurocode 2 beinhaltet mit den „Exposure Resistance Classes, ERC“ nun auch ein Konzept für einen leistungsbezogenen Nachweis der Dauerhaftigkeit. Im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton DAfStb wird die Frage behandelt, ob und wie dieses Konzept in Deutschland umgesetzt werden könnte. Zwei Aspekte sind dabei wichtig: Widersprüche zum deskriptiven Ansatz sollten sich in Grenzen halten und bereits Erreichtes bei der Dekarbonisierung und der Ressourceneffizienz darf nicht konterkariert werden. Am Beispiel der Carbonatisierung wird dies diskutiert.

1 Hintergrund

1.1 Leistungsbezogene Nachweise (Performance)

Im Zusammenhang mit der Frage, welche Maßnahmen die Dekarbonisierung von Zement und Beton in der Baustoffanwendung am besten unterstützt können, fällt ein ums andere Mal der Begriff „Performance“. Sind leistungsbezogene Nachweise also ein „Allheilmittel“? Das Regelwerk des Betonstraßenbaus z.B. sieht seit einigen Jahren zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion Performanceprüfungen der Betone vor. Ähnlich ist es bei Bahnschwellen. In beiden Fällen leisten diese Konzepte gute Dienste: Seit ihrer Einführung werden Schäden sicher vermieden. Das ist ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Verwendung des Betons.

In weiten Teilen des Betonbaus wird das Thema Dauerhaftigkeit derzeit dagegen über deskriptive Regeln (maximaler Wasserzementwert, Mindestzementgehalt, Mindestdruckfestigkeitsklasse, Mindestbetondeckung) behandelt: Das Regelwerk beruft sich auf baupraktische Erfahrungen. Die nächste Ausgabe des Eurocode 2 (EC2, E DIN EN 1992-1-1:2021-10) beinhaltet mit den „Exposure Resistance Classes, ERC“ nun auch ein Konzept für einen leistungsbezogenen Nachweis der Dauerhaftigkeit. Grundlage sind Prüfungen der Leistungsfähigkeit des Betons im Labor sowie Erkenntnisse aus Zuverlässigkeitsberechnungen (z.B. nach fib Model code [1][1]). Im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) wird die Frage behandelt, ob und wie dieses Konzept in Deutschland umgesetzt werden könnte. Eine Richtlinie ist in Vorbereitung.

1.2 Das ERC-Konzept für Deutschland

Als Anwendungsbereich einer Richtlinie sind die Expositionsklassen XC1 bis XC4, XF1, XA1, XS1 und XD1 vorgesehen. Das ist im Prinzip der übliche Hochbau. Bis auf einen Mindest-

klinkergehalt von 70 kg je m³ Beton und das Mindestleimvolumen nach E DIN 1045-2:2022-07 sollen alle deskriptiven Elemente entfallen. Der Mindestklinkergehalt ergibt sich aus dem aktuellen Regelwerk: Im bewehrten Außenbauteil kann Beton mit CEM III/B und Flugascheanrechnung verwendet werden. Damit soll die notwendige Alkalitätsreserve in Bauteilen mit metallischer Bewehrung sichergestellt werden. Der Klinkergehalt im Beton würde anhand des Klinkergehalts der verwendeten Zementart berechnet. Das Konzept wäre anwendbar auf Betone mit Zementen gemäß DIN EN 197-1, 197-5 und 197-6.

Es sind drei Klassen für den Nachweis der Carbonatisierung und drei Klassen für den Nachweis des Widerstands gegen das Eindringen von Chloriden vorgesehen. Damit würde die Klassenanzahl im Vergleich zum EC2 deutlich reduziert. Die Mindestbetondeckung ergibt sich zum Beispiel aus dem Carbonatisierungswiderstand des Betons (XRC-Klasse), der Expositionsklasse und der Mindestnutzungsdauer (50 oder 100 Jahre, Bild 1).

Frost bei mäßiger Wassersättigung XF1 und ein geringer chemischer Angriff XA1 sollen ohne prüftechnischen Nachweis bei Einhaltung einer Mindestfestigkeitsklasse als nachgewiesen gelten. Der Betonhersteller könnte nun als Alternative zum deskriptiven Konzept eine Optimierung der Betonzusammensetzung beispielsweise im Hinblick auf die Verringerung des Klinkergehalts vornehmen. Hierzu könnte er – um zwei Beispiele zu nennen – den Mindestzementgehalt der Norm unterschreiten und zum Erreichen des Mindestleimvolumens weitere Betonzusatzstoffe (Flugasche, Kalksteinmehl) verwenden oder, als zweites Beispiel, einen CEM VI-Zement gemäß EN 197-5 auch ohne allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Anwendung einsetzen. Der Nachweis der Eignung des Betons erfolgt anhand entsprechender Prüfungen und Einordnung in die genannten Klassen.

Expositions- widerstands- klasse	Expositions-klasse							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 0,5	10	10	10	10	10	10	10	10
XRC 1	10	10	10	10	10	15	10	15
XRC 2	10	15	10	15	15	15	15	25
XRC 3	10	15	15	20	20	30	20	30
XRC 4	10	20	15	25	25	35	25	40
XRC 5	15	25	20	30	25	45	30	45
XRC 6	15	25	25	35	35	55	40	55
XRC 7	15	30	25	40	40	60	45	60

Die Bezeichnung der Widerstandsklasse für die durch Carbonatisierung induzierte Korrosion von Betonstahl (XRC) wird aus der Carbonatisierungstiefe in mm als charakteristischer Wert (90 % Quantil) abgeleitet, die sich nach 50 Jahren unter folgenden Referenzbedingungen ergibt: konstante CO₂-Konzentration von 400 ppm (0,04 Vol-%), konstante relative Luftfeuchte von 65 % bei einer konstanten Temperatur von 20 °C. XRC hat die Dimension eine Carbonatisierungsrate mm^{1/2}/(Jahr).

Bild 1: Konzept der Expositionswiderstandsklassen im neuen Eurocode 2 am Beispiel Carbonatisierung (XRC) – Mindestbetondeckungen in mm

Die Einführung leistungsbezogener Nachweise als Alternative zu den deskriptiven Regeln des Betonbaus kann somit eine sinnvolle Ergänzung darstellen. Hersteller könnten ihre Betonzusammensetzungen im Hinblick auf eine Reduzierung der CO₂-Emissionen und den Ressourceneinsatz optimieren, ohne dass die Dauerhaftigkeit der Betonbauwerke in Frage gestellt wird. Da man aber nicht verhindern kann, dass auch Betone, die nach dem deskriptiven Ansatz verwendet werden können, zusätzlich auch geprüft werden, dürfen möglichst keine Widersprüche zwischen ERC-Konzept und deskriptiven Regeln entstehen, so dass bereits Erreichtes bei der Dekarbonisierung und der Ressourceneffizienz nicht konterkariert wird. Am Beispiel der Carbonatisierung wird dies nachfolgend diskutiert.

2 Ausgangssituation

2.1 Klinkereffiziente Zemente als wichtiger Baustein zur Dekarbonisierung der Betonbauweise

Seit 1990 ist es gelungen, die CO₂-Emissionen der Zementherstellung in Deutschland sowohl spezifisch, d.h. in kg/t Zement als auch absolut in einer Größenordnung von 20 % bis 25 % zu reduzieren. Damit wurde der absolute CO₂-Ausstoß in der deutschen Zementindustrie von rd. 26,5 Mio. t CO₂ auf 20 Mio. t und die spezifischen CO₂-Emissionen je t Zement von rd. 730 kg auf rd. 590 kg verringert ([2], Bild 2).

Entscheidend für diese Minderungserfolge waren neben Verbesserungen der thermischen Effizienz vor allem zwei Faktoren: erstens die Senkung der Klinkergehalte im Zement und zweitens der verstärkte Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe, durch die fossile Energieträger mehrheitlich ersetzt wurden. Vor diesem Hintergrund hat der Anteil der Portlandzemente CEM I am Inlandsversand kontinuierlich ab- und der der CEM II-Zemente entsprechend zugenommen [2].

Der Klinker-Zement-Faktor konnte in den vergangenen Jahrzehnten auf 71 % gesenkt werden. Dadurch haben die Zementhersteller in Deutschland in signifikanter Weise CO₂-Emissionen eingespart.

Die Verwendung von klinkereffizienten Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen hat in Deutschland also eine lange und erfolgreiche Tradition. Die aktuellen Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 enthalten die Anwendungsregeln für Normzemente in Abhängigkeit von den Expositionsklassen. Derzeit

Tafel 1: Zementarten, die in allen Expositionsklassen verwendet werden können

Portlandzement CEM I
Portlandhüttenzemente CEM II/A-S und CEM II/B-S
Portlandschieferzemente CEM II/A-T und CEM II/B-T
Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL
Portlandflugaschzemente CEM II/A-V und CEM II/B-V
Portlandkompositzemente CEM II/A-M mit S, LL, T, V bzw. D ¹⁾
Portlandkompositzemente CEM II/B-M mit S, T, V bzw. D ¹⁾
Portlandkompositzemente CEM II/B-LL, CEM II/B-M und ggf. CEM II/C-M sowie weitere Zemente mit abZ (Anwendungszulassung az)
Hochofenzemente CEM III/A ²⁾
Hochofenzemente CEM III/B ³⁾

¹⁾ (D-V) nicht in XF2/XF4.

²⁾ Expositionsklasse XF4: CEM III/A der Festigkeitsklasse ≥ 42,5 N oder der Festigkeitsklasse 32,5 R mit bis zu 50 M.-% Hüttsand.

³⁾ CEM III/B darf in XF4 nur für die folgenden Anwendungsfälle verwendet werden:

^{a)} Meerwasserbauteile: w/z ≤ 0,45; Mindestfestigkeitsklasse C35/45 und z ≥ 340 kg/m³

^{b)} Räumlaufbahnen: w/z ≤ 0,35; Mindestfestigkeitsklasse C40/50 und z ≥ 360 kg/m³;

Beachtung von DIN 19569-1. Auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden.

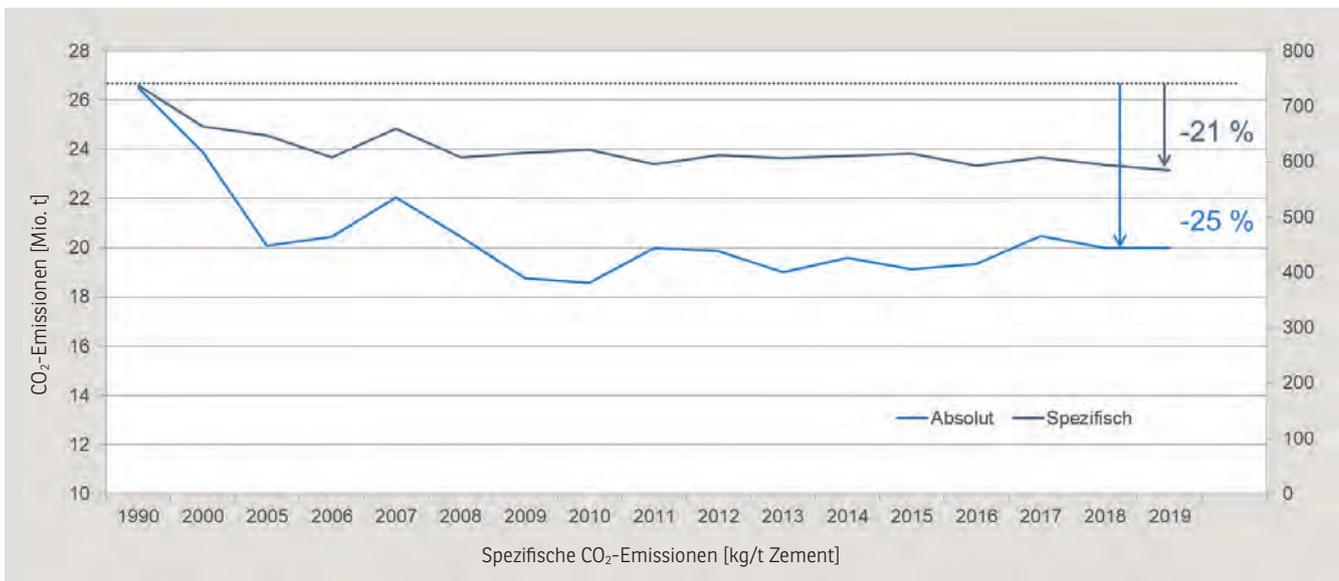


Bild 2: CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie [2] (Quellen: VDZ, GNR, Deutsche Emissionshandelsstelle)

Tafel 2: Zemente mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (Stand: April 2024)

Zementart	Anzahl
CEM II/B-M (S-LL)	17
CEM II/B-M (V-LL)	6
CEM II/B-M (T-LL)	2
CEM II/B-M (S-V)	2
CEM II/B-M (S-P)	1
CEM II/B-Q	1
CEM II/B-LL	1
CEM II/A-P und CEM II/B-P	1
CEM II/C-M (S-LL)	16
CEM II/C-M (V-LL)	1
CEM II/C-M (T-LL)	1
CEM II/C-M (S-P)	1
diverse Zemente mit rezykliertem Feinstoff aus Betonbruch als Nebenbestandteil	6
CEM IV/B-Q	1
CEM V/A (S-V)	2
CEM V/A (S-P)	1
Portland-Schiefer-Kalkstein-CSA-Zement	1
Schieferhochofenzement	1
Portland-Kalkstein-Hüttenzement	2

sind die in Tafel 1 gezeigten Zementarten in allen Expositionsklassen verwendbar.

Enthält die Betonnorm für einen Zement keine oder eine sehr eingeschränkte Anwendung, so wird in diesen Fällen der Nachweis der Eignung für die Anwendung in bestimmten Expositionsklassen durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Anwendungszulassung AZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) erbracht. Aktuell (Auflistung des DIBt 04/2024) gibt es insgesamt 64 dieser Zulassungen (Tafel 2).

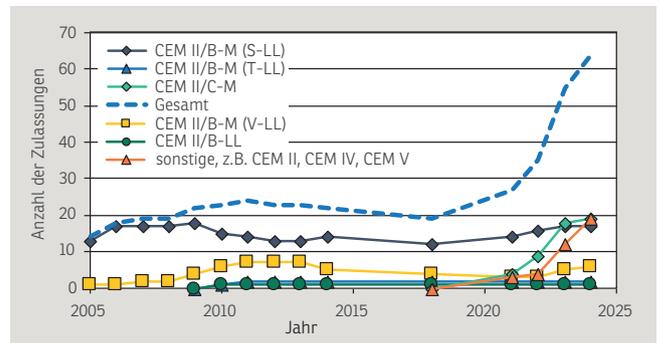


Bild 4: Entwicklung der Anzahl der Bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen der vergangenen Jahre [3]

Die Verwendung klinkereffizienter Zemente macht im Szenario „Klimaneutralität“ der Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ des VDZ [2] etwa 20 % der angenommenen Minderungen aus und ist somit ein wichtiger Hebel. Der Markteinführung dieser Zemente kommt daher eine große Bedeutung zu und gemeinsames Ziel muss es sein, Betonherstellung und Bauausführung hierauf auszurichten.

2.2 Deskriptive Regeln der DIN 1045-2 im europäischen Vergleich

2.2.1 Betonzusammensetzung

Bild 5 zeigt, dass Deutschland im europäischen Vergleich in einigen (gängigen) Expositionsklassen relativ hohe w/z-Werte und geringe Mindestzementgehalte hat. In der Expositionsklasse XC1 erlaubt Deutschland beispielsweise einen Mindestzementgehalt von 240 kg/m³ in Kombination mit einem höchstzulässigen Wasserzementwert von w/z = 0,75, während in der EN 206 260 kg/m³ und w/z = 0,65 empfohlen werden. In XF1 erlaubt Deutschland 280 kg/m³ und w/z = 0,60, die EN 206 empfiehlt 300 kg/m³ und w/z = 0,55.

2.2.2 Anwendung von Zementen

Für die Anwendung von Zementen in Deutschland gilt bisher überwiegend: Eine Anwendung ist entweder erlaubt oder ausgeschlossen. Eine Variation der Grenzzusammensetzung in Abhängigkeit von der (Labor-) Leistungsfähigkeit des Zements

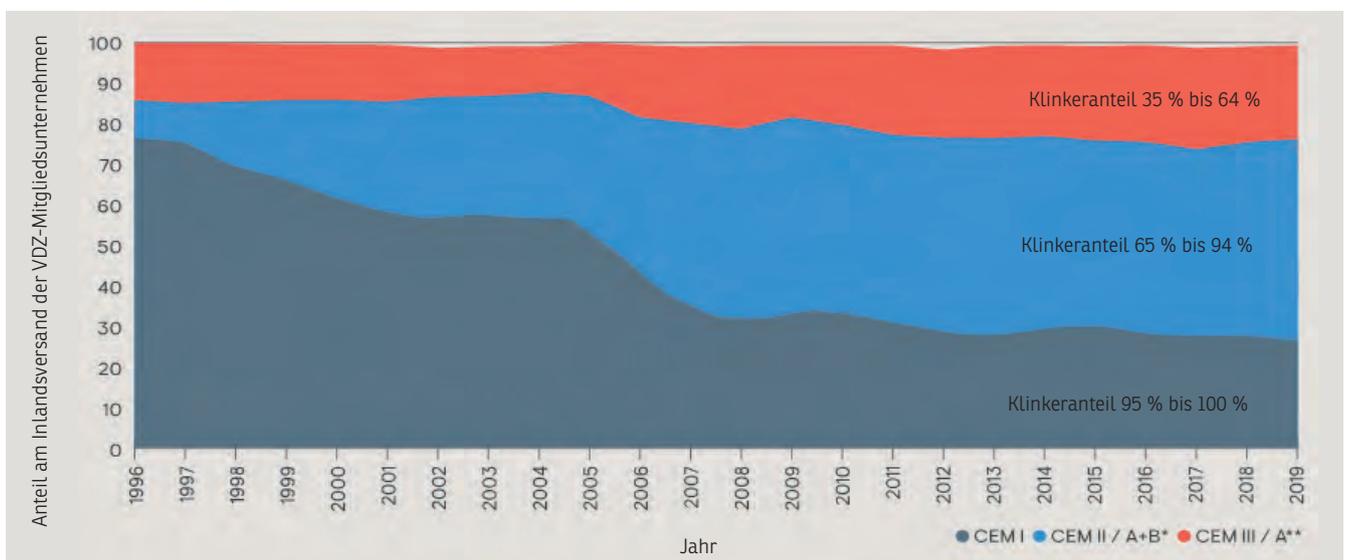


Bild 3: Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der vergangenen Jahre [2]

Lebensdauer von Betonbau- werken verlängern

Gerne unterstützen wir Sie mit folgenden Leistungen:

- Bauwerksdiagnose und Beurteilung der Untersuchungsergebnisse
- Aufklärung von Schadensfällen (z.B. Rissbildungen und Verfärbungen)
- Abschätzung der Restnutzungsdauer des Bauwerks und der Stahlbetonbauteile
- Ermittlung des Instandsetzungsbedarfs
- BIM-gestützte Schadensaufnahme und Instandsetzungsplanung



Profitieren Sie von unserem ganzheitlichen Bauwerksmanagement, um die Lebensdauer Ihrer Betonbauwerke effizient zu verlängern.



Kontaktieren Sie uns:

bte@vdz-online.de
+49(0)211 45 78-343
<https://vdz.info/c2ecj>

Folgen Sie uns auf [LinkedIn](#)

	Expositionsklassen																	
	Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko	Durch Carbonatisierung verursachte Korrosion				Durch Chloride verursachte Korrosion						Frost-/Tauwechsel				Aggressive chemische Umgebung		
						Meerwasser			Chloride ausgenommen aus Meerwasser									
X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2	XA 3	
Maximaler w/z-Wert ^c	-	0,65 (0,75)	0,60 (0,75)	0,55 (0,65)	0,50 (0,60)	0,50 (0,55)	0,45 (0,50)	0,45 (0,45)	0,55 (0,55)	0,55 (0,50)	0,45 (0,45)	0,55 (0,60)	0,55 (0,55)	0,50 (0,55)	0,45 (0,50)	0,55 (0,60)	0,50 (0,50)	0,45 (0,45)
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C12/15 (C8/10)	C20/25 (C16/20)	C25/30 (C16/20)	C30/37 (C20/25)	C30/37 (C25/30)	C30/37 (C30/37)	C35/45 (C35/45)	C35/45 (C35/45)	C30/37 (C30/37)	C30/37 (C35/45)	C35/45 (C35/45)	C30/37 (C25/30)	C25/30 (C25/30)	C30/37 (C25/30)	C30/37 (C30/37)	C30/37 (C25/30)	C30/37 (C35/45)	C35/45 (C35/45)
Mindestzementgehalt [kg/m ³]	-	260 (240)	280 (240)	280 (260)	300 (280)	300 (300)	320 (320)	340 (320)	300 (300)	300 (320)	320 (320)	300 (280)	300	320 (300)	340 (320)	300 (280)	320 (320)	360 (320)
Mindestluftporengehalt [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a	-	-	-
Andere Anforderungen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Gesteinskörnungen nach EN 12620 mit ausreichendem Frost-/Tauwiderstand				-	Zement mit hohem Sulfatwiderstand ^b	

^a Falls kein Luftporenbeton verwendet wird, sollten die Betoneigenschaften nach einem geeigneten Prüfverfahren im Vergleich zu Beton, für den der Frost-Tau-Widerstand für die maßgebende Expositionsklasse nachgewiesen ist, geprüft werden.

^b Wenn Sulfat in der Umgebung zu den Expositionsklassen XA2 und XA3 führt, ist die Verwendung von Zement mit hohem Sulfatwiderstand nach EN 197-1 oder den entsprechenden ergänzenden nationalen Normen unabdingbar.

^c Bei Anwendung des k-Wert-Ansatzes werden der maximale w/z-Wert und der Mindestzementgehalt nach 5.2.5.2 modifiziert.

Anforderung national geringer
 Anforderung national gleich
 Anforderung national höher

Bild 5: EN 206 vs. DIN 1045-2 (Klammerwerte)

gibt es nicht. Obwohl in Laborprüfungen Unterschiede bestehen (Bild 6), wurde wohl auf der Grundlage entsprechender Praxiserfahrungen und im Sinne der Anwenderfreundlichkeit nicht weiter differenziert (Ausnahmen: Zemente mit hohem Sulfatwiderstand SR und Zemente mit niedrigem Na₂O-Äquivalent NA).

Für die Praxis hat dieser Ansatz den Vorteil, einfach und wenig anfällig für Fehler zu sein. Zudem gibt es auf diesem Wege ein flächendeckendes Angebot an Normzementen und (weitgehend) einheitliche Regelung für die Betonindustrie in Deutschland (Tafel 3).

Bei der Überlegung, welche Bedeutung die Unterschiede in den Laborprüfungen für die Ausgestaltung der normativen Regelungen in der Praxis haben, dürften zum Zeitpunkt der Festlegung der aktuellen Regelungen auch die Abnahme der CO₂-Diffusionsgeschwindigkeit mit anwachsendem Feuchtegehalt (Bild 7, links) und die Abhängigkeit des Korrosionsrisikos von den Umgebungsbedingungen (Bild 7, rechts) berücksichtigt worden sein.

Die Regeln der DIN 1045-2 für die Verwendung der Zemente in den entsprechenden Betonzusammensetzungen kommen seit

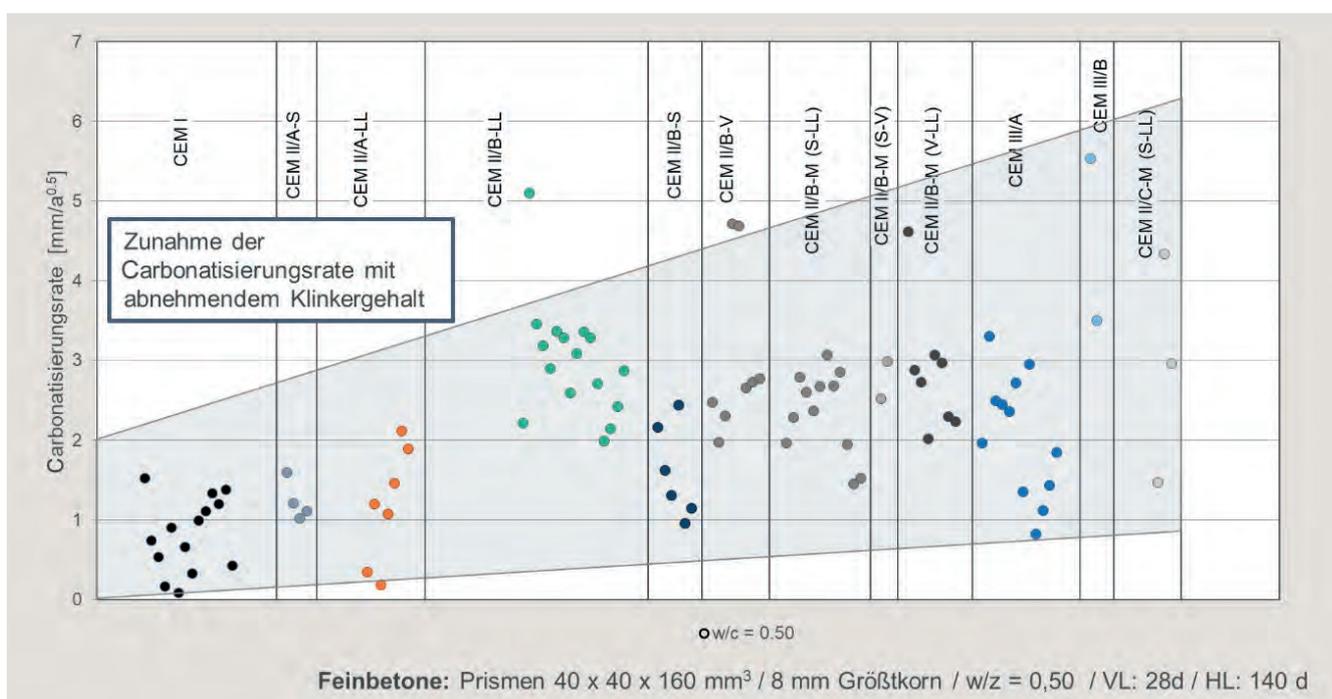


Bild 6: Carbonatisierungsraten in Laborprüfungen bei Verwendung verschiedener Zemente/Zementarten (Quelle: VDZ)

Tafel 3: Mögliche Zemente für einen Beton der Expositionsklasse XC4 in Deutschland

Anforderungen: max. w/z = 0,60, min. z = 280 kg/m ³ , min. C = C25/30, min. c = 25 mm
Mögliche Zemente:
Portlandzement CEM I
Portlandhüttenzemente CEM II/A-S und CEM II/B-S
Portlandschieferzemente CEM II/A-T und CEM II/B-T
Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL
Portlandflugaschezemente CEM II/A-V und CEM II/B-V
Portlandkompositzemente CEM II/A-M mit S, LL, T, V bzw. D
Portlandkompositzemente CEM II/B-M mit S, T, V bzw. D
Portlandkompositzemente CEM II/B-LL, CEM II/B-M und CEM II/C-M mit abZ (Anwendungszulassung AZ)
Hochofenzemente CEM III/A
Hochofenzemente CEM III/B

2000/2001 zur Anwendung. Vergleichbare Regelungen bestehen aber deutlich länger und die entsprechenden Zusammensetzungen der Zemente und Betone bei Carbonatisierung waren dabei in den vergangenen rd. 50 Jahren durchaus vergleichbar (siehe hierzu Abschnitt 2.3).

In der Praxis scheinen sich diese Betonzusammensetzungen also bewährt zu haben. Im DAfStb jedenfalls sind keine Schäden dokumentiert, die auf die Leistungsfähigkeit des nach den aktuellen deskriptiven zusammengesetzten Betons bzw. der darin enthaltenen Zemente abgehoben hätte.

2.3 Historische Entwicklung der Anforderungen an die Betonzusammensetzung

Wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, werden die Betonzusammensetzungen (Zementart, -gehalt, Wassermenge) der DIN 1045-2 seit 2001 verwendet und es liegen somit keine 50 Jahre Erfahrung in der Anwendung dieses Regelwerks vor. Im Folgenden werden daher die Anforderungen an die Betonzusammensetzung von heute, 1988 und 1968 verglichen. In den Normen DIN 1045 von 1968 bzw. 1988 war der Begriff der Expositionsklasse noch nicht eingeführt. Es wurde unterschieden nach bewehrtem und unbewehrtem Beton, Betonen für Innen- und Außenbauteile und Betonen mit hohem bzw. sehr hohem Frost- und Frosttausalz widerstand. Die Expositionsklassen in Tafel 4 sind daher sinngemäß zu verstehen. Die Auswertung zeigt, dass normale Innen- und Außenbauteile schon seit 1968 mit vergleichbaren Wassermengewerten (w/z = 0,65 – 0,75 bzw. w/z = 0,60) hergestellt wurden. Auch die Zusammensetzung der für solche Bauteile anwendbaren Zemente (z.B. HOZ mit bis zu 85 M.-% Hüttsand) war bereits 1968 möglich.

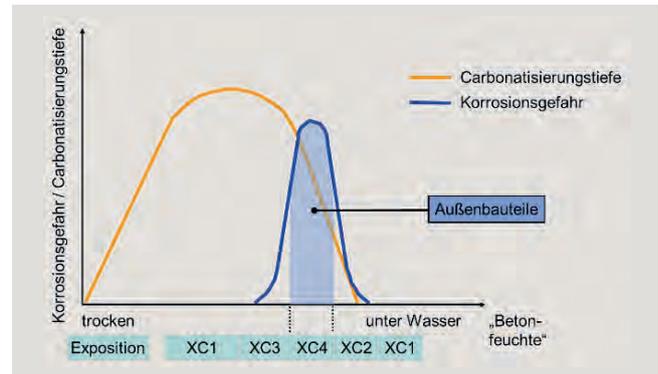
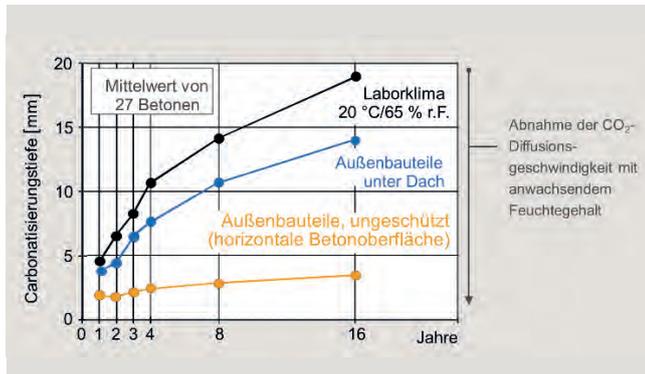


Bild 7: Carbonatisierung und Korrosionsgefahr: Einfluss der Umgebungsbedingungen (Quellen: links [4], rechts in Anlehnung an [5])

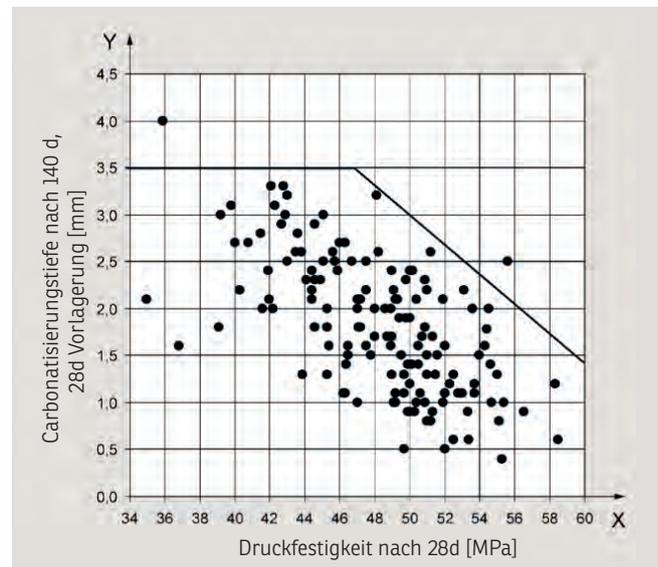
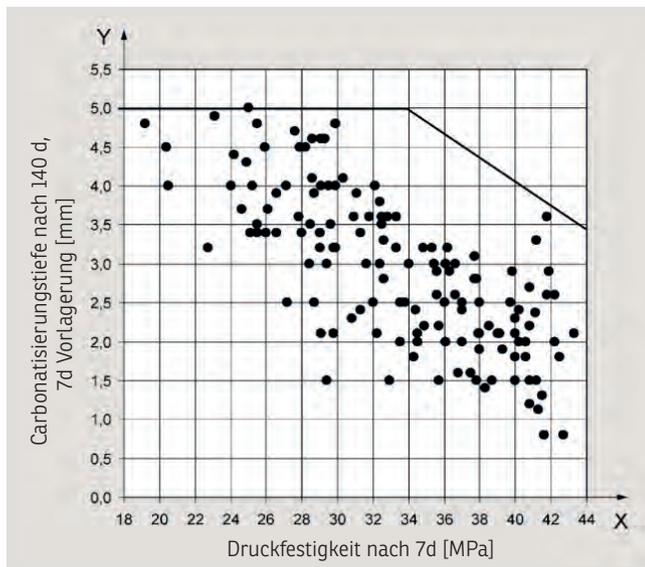


Bild 8: Bewertungshintergrund für Carbonatisierung (hier: Carbonatisierungstiefe) in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt [6]

Tafel 4: Anforderungen an die Betonzusammensetzung gemäß DIN 1045 bzw. DIN 1045-2

Jahr	Expositionsklasse ¹⁾	max. w/z	min. z [kg/m ³]	LP ²⁾ [%]	Zemente	Bemerkung
1968	XC	0,65	280	–	DIN 1164, Z275	Innenbauteile
	XC	0,75	240	–	DIN 1164, ≥ Z375	Innenbauteile
	XC4, XF1	0,60	–	–	DIN 1164	Außenbauteile
	XC4, XF1	0,70	–	≥ 4,0	DIN 1164	Außenbauteile
	XF3, 4	0,50	–	≥ 4,0	DIN 1164	Außenbauteile, hoher Frost- und Frost-Tausalz-widerstand
1988	XC	0,65	280	–	DIN 1164, Z25	Innenbauteile
	XC	0,75	240	–	DIN 1164, ≥ Z35	Innenbauteile
	XC4, XF1	0,60	300	–	DIN 1164	Außenbauteile
	XC4, XF1	0,60	270	–	DIN 1164, Z45/Z55	Außenbauteile
	XF3, 4	0,50	300	≥ 4,5	DIN 1164, ≥ Z35	Außenbauteile, hoher Frost- und Frost-Tausalz-widerstand
	XF3, 4	0,50	270	≥ 4,5	HOZ, ≥ Z45L	Außenbauteile, hoher Frost- und Frost-Tausalz-widerstand
heute	XC3	0,65	260	–	siehe Tabellen F.3.1ff von DIN 1045-2	
	XC4, XF1	0,60	280	–		
	XF4	0,50	320	≥ 4,5		

¹⁾ Die Einordnung bzw. Angabe ist für die Normen DIN 1045: 1968 und DIN 1045:1988 sinngemäß zu verstehen.
²⁾ für Beton mit einem Größtkorn von 16 mm

2.4 Bauaufsichtlicher Bewertungshintergrund Carbonatisierung

Die einheitliche Verwendung der Zemente in Deutschland ist auch Grundlage in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen. Die Bilder 8 und 9 zeigen dies anhand der Carbonatisierungstiefen und der Carbonatisierungsgeschwindigkeiten. Die Prüfung erfolgt an Feinbetonprismen mit w/z = 0,50 und Sieblinie A/B 8. Die Vorlagerung beträgt 7 d bzw. 28 d und das Bewertungskriterium ist die Carbonatisierungstiefe $d_{c140 \text{ Tage}}$ im Verhältnis zur Druckfestigkeit nach Vorlagerung.

Es gibt eine obere Grenze für die Carbonatisierungstiefe bzw. für die Carbonatisierungsrate. Diese berücksichtigt bzw. beinhaltet in jedem Fall Zemente CEM III/A, z.T. auch CEM III/B. Unterhalb der entsprechenden Obergrenzen erfolgt – entsprechend dem normativen Ansatz – keine Differenzierung der Zementarten. Die Obergrenze für die Carbonatisierungsrate bei 7-tägiger Vorlagerung von 0,5 mm/d^{0,5} entspricht in etwa einem Wert von 9,5 mm/a^{0,5}.

Dieser Bewertungshintergrund hat Eingang gefunden in den CEN/TR 16563:2013 sowie in europäische Bewertungsdokumente bzw. europäische technische Zulassungen (siehe z.B. EAD 150001-00-0301 Calcium Sulphoaluminate based cement).

2.5 Deskriptive Regeln der DIN 1045 vs. Lebensdauerbetrachtungen

E DIN EN 1992-1-1:2021-10, Abschnitt 6.4 (Expositions-widerstandsklassen) und der Richtlinienentwurf des DAfStb gehen schlussendlich zurück z.B. auf das europäische Projekt Duracrete [7], den fib Modelcode SLD [1], die Dissertation von Professor Gehlen [8], das Positionspapier des DAfStb [9] und auch das BAW-Regelwerk MDCC [10]. Gewisse Widersprüche zwischen den Ergebnissen der leistungsbezogenen Nachweise und den in Deutschland aktuell gültigen deskriptiven Regeln des Betonbaus waren von Anfang an offenkundig.

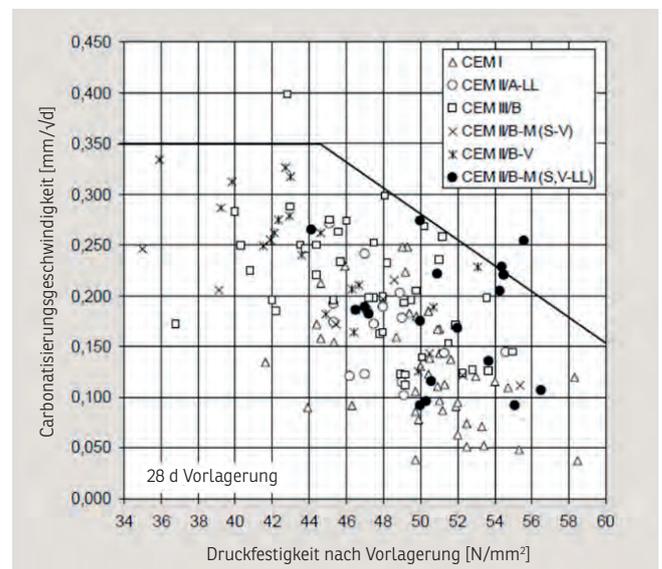
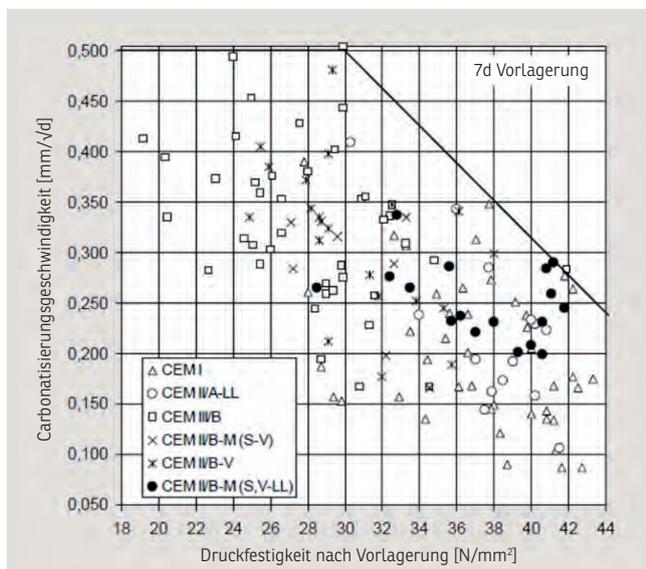


Bild 9: Bewertungshintergrund für Carbonatisierung (hier: Carbonatisierungsrate in mm/Öd) in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt [6]

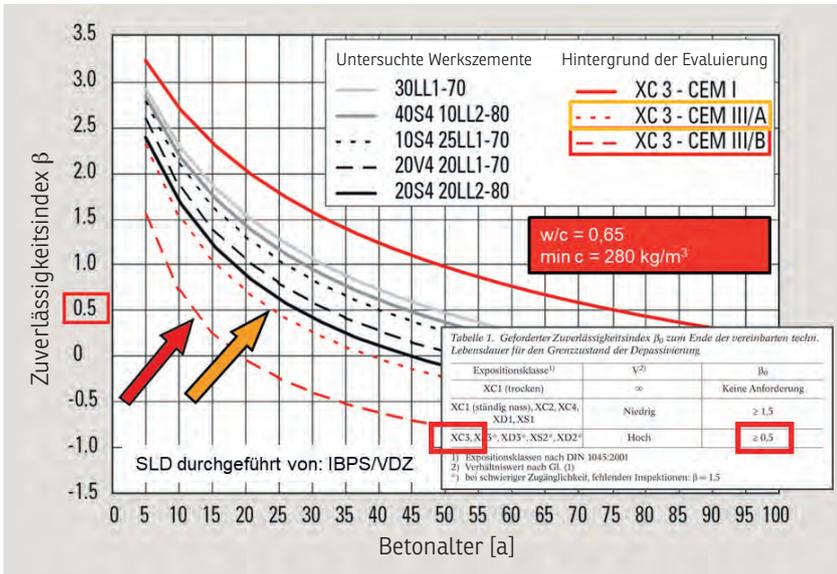


Bild 10: Ergebnis von Lebensdauerbetrachtungen (Grenzzustand der Depassivierung in der Expositionsklasse XC3) [11]

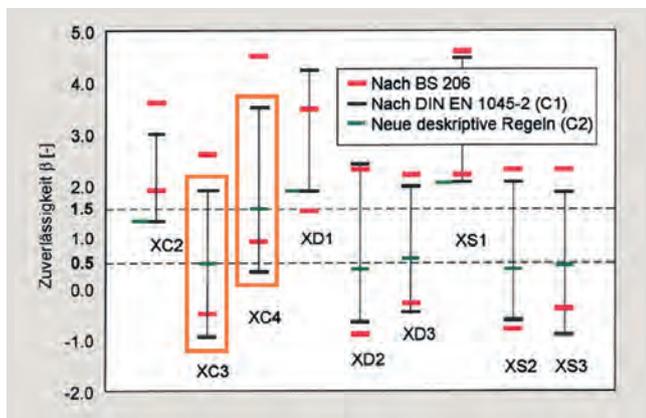


Bild 11: Zuverlässigkeiten bzgl. des Grenzzustands der Depassivierung der Bewehrung nach [12]

In einem Forschungsprojekt des VDZ [11] zu seinerzeit neuen klinkereffizienten Zementen wurden vom Ingenieurbüro Professor Schießl (IBPS) und dem VDZ neben Laborversuchen Lebensdauerbetrachtungen auf der Grundlage des fib Modelcode [1] und des DAfStb-Positionspapiers [9] durchgeführt.

Die berechneten Zuverlässigkeitsindizes für die Expositionsklasse XC3 der untersuchten Betone sind in Bild 10 für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren dargestellt. Als Zielzuverlässigkeit wurde auf Basis der Angaben aus [12], [9] und [13] ein Wert des Zuverlässigkeitsindex von $\beta > 0,5$ festgelegt. Hiermit wird eine Eintrittswahrscheinlichkeit für Depassivierung ($\rho_f \approx 31\%$) zugelassen. Der Hintergrund ist, dass aufgrund der mäßigen Feuchte in der Expositionsklasse XC3 auch nach der Depassivierung der Betondeckung nicht mit einer signifikanten Korrosion zu rechnen ist.

Für einen XC3-Beton mit CEM III/A betrug die Zeit bis zum Erreichen des β -Werts von 0,50 etwa 25 Jahre, für den entsprechenden Beton mit CEM III/B etwa zwölf Jahre. Zu vergleichbaren Ergebnissen kam das Forscherteam um Christoph Gehlen und Stephanie von Greve-Dierfeld im DAfStb-Projekt V464 [12] (Bild 11).

2.6 Zwischenfazit

Deutschland hat im europäischen Vergleich in einigen (gängigen) Expositionsclassen relativ hohe w/z -Werte und geringe Mindestzementgehalte. Widersprüche zwischen den Ergebnissen von Lebensdauerbetrachtungen auf der Grundlage des fib Modelcode sowie des DAfStb-Positionspapiers und den in Deutschland aktuell gültigen deskriptiven Regeln des Betonbaus waren daher von Anfang an offenkundig. Trotz dieser Ergebnisse wurden im DAfStb keine Schäden dokumentiert, die auf die Leistungsfähigkeit des nach den aktuellen deskriptiven zusammengesetzten Betons bzw. der darin enthaltenen Zemente abgehoben hätten. Die im aktuellen Regelwerk festgelegten Betonzusammensetzungen und die verwendbaren Zemente scheinen also in der Praxis zu funktionieren, auch wenn Laborergebnisse anderes vermuten lassen. Grenzwerte für zukünftige Regelwerke sollten daher das aktuelle Regelwerk und die damit verbundenen Praxiserfahrungen nicht außer Acht lassen. Ergebnisse aus Prüfungen beispielsweise in bauaufsichtlichen Zulassungsverfahren spiegeln dies bis heute wider.

Teil 2 des Beitrags erscheint in beton 7+8/2024.

Dauerhaftigkeit von Beton – Konzepte heute und morgen insbesondere am Beispiel der Carbonatisierung; Teil 2

Christoph Müller und Sebastian Palm, Düsseldorf

Die Einführung leistungsbezogener Nachweise als Alternative zu den deskriptiven Regeln des Betonbaus kann eine sinnvolle Ergänzung darstellen. Das Regelwerk des Betonstraßenbaus z.B. sieht seit einigen Jahren zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion Performanceprüfungen der Betone vor. Ähnlich ist es bei Bahnschwellen aus Beton. In beiden Fällen leisten diese Konzepte gute Dienste: Seit ihrer Einführung werden Schäden sicher vermieden. Das ist ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Verwendung des Betons. In weiten Teilen des Betonbaus wird das Thema Dauerhaftigkeit derzeit dagegen durch deskriptive Regeln (maximaler Wasserzementwert, Mindestzementgehalt, Mindestdruckfestigkeitsklasse, Mindestbetondeckung) behandelt. Die nächste Ausgabe des Eurocode 2 beinhaltet mit den „Exposure Resistance Classes, ERC“ nun auch ein Konzept für einen leistungsbezogenen Nachweis der Dauerhaftigkeit. Im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton DAfStb wird die Frage behandelt, ob und wie dieses Konzept in Deutschland umgesetzt werden könnte. Zwei Aspekte sind dabei wichtig: Widersprüche zum deskriptiven Ansatz sollten sich in Grenzen halten und bereits Erreichtes bei der Dekarbonisierung und der Ressourceneffizienz darf nicht konterkariert werden. Am Beispiel der Carbonatisierung wird dies diskutiert.

3 Deskriptive Regeln der DIN 1045 vs. ERC-Konzept

3.1 Allgemeines

In den vorangegangenen Kapiteln (Teil 1 dieses Beitrags) wurde dargelegt, wie sich die aktuell gültigen Regelungen insbesondere für die Expositionsklassen „Carbonatisierung“ XC über viele Jahre entwickelt haben. Da keine Berichte über eine Häufung von Schadensfällen vorliegen, kann wohl davon ausgegangen werden, dass diese Regelungen zum Einsatz von Betonen in den Expositionsklassen XC ausreichend sicher sind. Daher können aus Versuchen an Praxis- und Laborbetonen, die gemäß diesen Regelungen konzipiert wurden, Hinweise für die Ausgestaltung einer ERC-Richtlinie gegeben werden. Die nachfolgend dargestellten Versuche wurden überwiegend an Betonen mit einem Größtkorn von mindestens 16 mm durchgeführt. Dabei handelte es sich sowohl um Betone aus dem Labor des VDZ als auch um solche aus Betonwerken von BTB-/VDZ-Mitgliedsunternehmen. Die Betone wiesen Leimgehalte zwischen 270 l/m³ und 320 l/m³ auf. Betonzusatzstoffe wurden nicht verwendet. Weitere Informationen enthält Anhang A. Teilweise wurden die Carbonatisierungstiefen nach DIN EN 12390-12 (Schnellprüfverfahren) ermittelt. Diese Ergebnisse wurden gemäß [5] in Carbonatisierungsgeschwindigkeiten bei einer CO₂-Konzentration von 0,04 Vol.-% umgerechnet. In Bild 12 werden die Ergebnisse mit Daten verglichen, die an Feinbetonen, wie sie in Zulassungsverfahren verwendet werden, ermittelt wurden.

Zur Einordnung der Ergebnisse werden verwendet:

- Betontechnologische Parameter: w/z-Wert, Größtkorn, Leimgehalt
- die Definition der XRC-Klassen nach aktuellem Entwicklungsstand einer DAfStb-Richtlinie bzw. einer entsprechenden DIN 1045-2 (Tafel 2)
- Zementart und Klinkergehalt im Beton

Ob mit diesen Kriterien die derzeit gültigen deskriptiven Regeln abgebildet würden, wird im Folgenden untersucht.

3.2 Größtkorn und Leimgehalt

In Abschnitt 2.4 (Teil 1 des Beitrags) wurde der Bewertungshintergrund aus den Verfahren für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen dargestellt. In den Zulassungsverfahren werden in diesen Bewertungshintergrund Ergebnisse von Feinbetonen mit einer Zusammensetzung $z = 450$ g, $w = 225$ g und GK (A/B 8) = 1350 g eingetragen. Diese Zusammensetzung weist, umgerechnet auf einen m³ Beton, einen Leimgehalt von etwa 440 l/m³ auf. Aufgetragen über dem Klinkergehalt (Bild 12) ordnen sich Versuchsergebnisse von Feinbetonen in den prinzipiellen Zusammenhang von Betonen mit einem Größtkorn > 8 mm ein. Der Grenzwert aus dem DIBt-Bewertungshintergrund erscheint da-

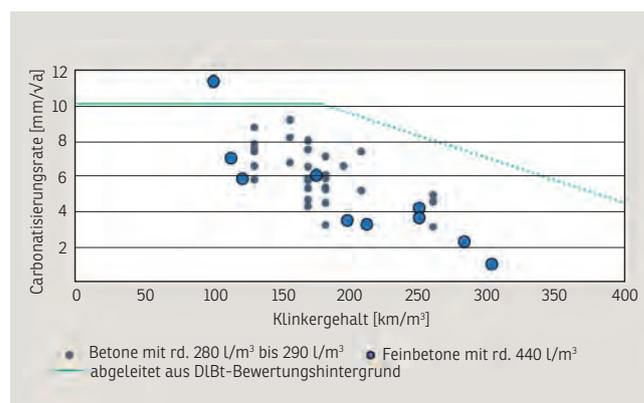


Bild 12: Zusammenhang zwischen Klinkergehalt und Carbonatisierungsrate bei verschiedenen Leimgehalten (Daten VDZ)

Tafel 2: Kriterien für die Erstprüfung – Carbonatisierung (DAfStb UA Dauerhaftigkeit D281)

XRC-Klasse	Bereiche der mittleren Carbonatisierungsgeschwindigkeit $k_{NACm, 140 d}$ bestimmt nach BAW MB MDCC, Anlage A in mm/va	Höchstzulässiger Mittelwert $k_{NACm, max, 140 d}$ für eine Serie aus $n \geq 3$ Prüfungen in mm/va (Kammertest nach DIN EN 12390-10 mit natürlicher CO_2 -Konzentration) ^{a) b)}
XRC 5	$\leq 4,5$	$\leq 4,5 - t_{0,100} \times s$
XRC 7	$4,5 < k_{NACm, 140 d} \leq 7,2$	$\leq 7,2 - t_{0,100} \times s$
XRC 9	$7,2 < k_{NACm, 140 d} \leq 9,0$	$\leq 9,0 - t_{0,100} \times s$

a) $t_{0,100}$ entspricht der Quantile der einseitigen t-Verteilung für ein Signifikanzniveau $\alpha = 0,100$ (...). Mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % liegt der Erwartungswert für den Mittelwert unterhalb der oberen Klassengrenze.
 b) s entspricht der Standardabweichung der Stichprobe aus $n \geq 3$ Prüfungen.
 Anmerkung: Für die Berechnung des höchstzulässigen Mittelwerts sind mindestens drei gültige Prüfergebnisse erforderlich (...).

her auch bei Betonen mit einem Größtkorn > 8 mm anwendbar. Dieser Grenzwert ist abhängig von der Festigkeit des Feinbetons nach Vorlagerung (siehe Bilder 8 und 9 in Teil 1 des Beitrags). Eine genaue Übertragung des funktionalen Zusammenhangs aus dem DIBt-Bewertungshintergrund auf die nachfolgenden Diagramme ist nicht ohne weiteres möglich. Die dort eingezeichneten Funktionen sind sinngemäß zu verstehen. Als Untergrenze zur Einhaltung dieses Grenzwertes ergibt sich hier ein Klinkergehalt von etwa 100 kg/m³.

3.3 Wasserzementwert und Zementart

In den nächsten Bildern sind die Grenzen der Klassen XRC5 bis XRC9 eingetragen. In Abhängigkeit von dem Wasserzementwert ergibt sich für die Betone mit Leimgehalten zwischen 270 l/m³ und 320 l/m³ der in Bild 13 dargestellte Zusammenhang. Betone mit Wasserzementwerten von $w/z = 0,65$ und Zementen CEM III/A bzw. CEM II/C liegen in den Klassen XRC7 und XRC9. Mit Wasserzementwerten um die 0,60 liegen die Werte im Bereich der Klasse XRC7. Eine Datenzusammenstellung des DAfStb (Bild 14) kommt zu vergleichbaren Ergebnissen, zeigt aber auch, dass Betone mit CEM III/B und Flugasche als Betonzusatzstoff außerhalb von XRC9 liegen können.

3.4 Wasserzementwert und Klinkergehalt

Für die Betone aus der VDZ-Datensammlung zeigt Bild 15 den Zusammenhang zwischen Klinkergehalt und Carbonatisierungsrate. Die Carbonatisierungsraten der Betone mit CEM III/A und CEM II/C lagen überwiegend innerhalb der Klasse XRC9 (Bereich 1). Für Betone mit CEM III/B liegt keine ausreichende Datenbasis vor. Ab einem Mindestklinkergehalt von mehr als rd. 180 kg/m³ (Bereich 2) liegen viele Betone innerhalb der Klasse XRC5. Für ein zielsicheres Erreichen dieser Klasse sind unter den derzeitigen Grenzbetonzusammensetzungen der DIN 1045-2 Mindestklinkergehalte von mehr als 250 kg/m³ (Bereich 3) erforder-

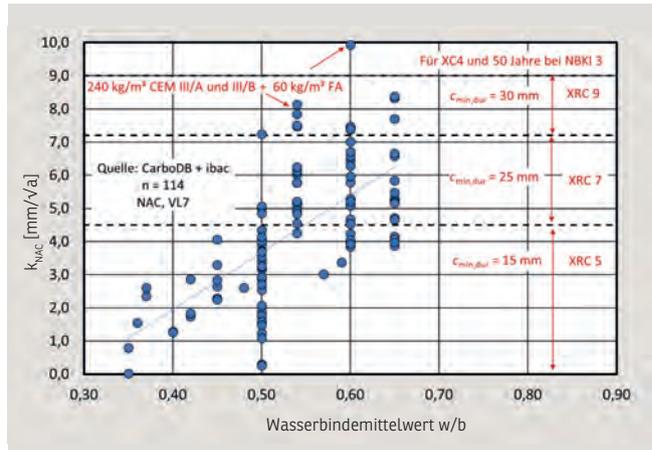


Bild 14: Zusammenhang zwischen Wasserbindemittelwert und Carbonatisierungsraten, Auswertung des DAfStb (Professor Wiens) [14] (verändert)

lich. Auf dieser Grundlage wurden die Eckpunkte der Tafel 3 für die Nachbehandlungsklasse 3 vorgeschlagen.

Im Ergebnis könnten Betone mit etwa 50 M.-% Klinker im Zement, d.h. z.B. CEM III/A 42,5 N bzw. CEM II/C-M (S-LL, V-LL, T-LL) auch im ERC-Konzept mit relativ geringen Änderungen der heute gültigen Grenzzusammensetzungen, der Betondeckung und des Nachbehandlungsregims verwendet werden. Für Betone mit Klinkergehalten unterhalb von rd. 50 M.-% (z. B. CEM III/B) kann eine solche Aussage auf Grund mangelnder Datenlage noch nicht getroffen werden.

4 Klinker-/CO₂-Effizienz vs. Dauerhaftigkeit

Die Prüfungen der Zemente im Beton im Hinblick auf Dauerhaftigkeit (Carbonatisierung, Chlorideindringen, Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand) erfolgen heute bei bauaufsichtlichen

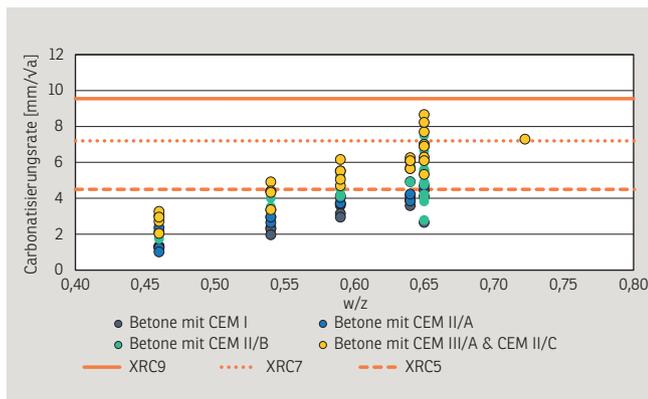


Bild 13: Zusammenhang zwischen Wasserzementwert und Carbonatisierungsraten, Einordnung nach ERC-Klasse und Zementart (Daten aus Tafel 6)

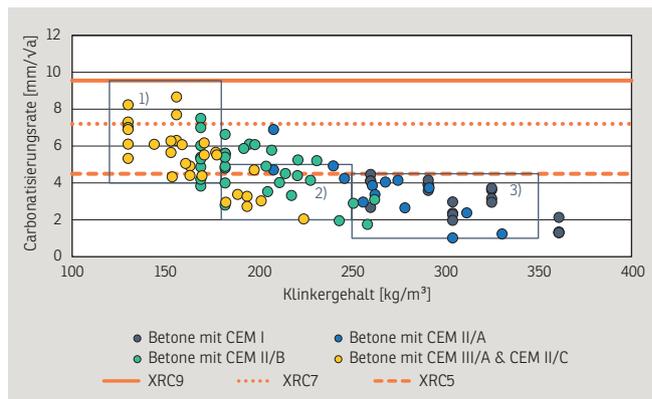


Bild 15: Zusammenhang zwischen Klinkergehalt und Carbonatisierungsraten, Einordnung nach ERC-Klasse und Zementart (Daten aus Tafel 6)

Tafel 3: Mindestbetondeckungen $c_{min,dur}$ für Betonstahl – Carbonatisierung – Beispiel Nachbehandlungsklasse 3 (DAFStb UA Dauerhaftigkeit D238)

Expositionsklasse	$c_{min,dur}$ für geplante Nutzungsdauer 50 Jahre		
	XRC5	XRC7	XRC9
XC2, XC3	15 ^{a)}	15	20
XC4	15	25	30
–	$c_{min,dur}$ für geplante Nutzungsdauer 100 Jahre		
XC2, XC3	20 ^{a)}	20	30
XC4	20	35	40

^{a)} Bei Betonfertigteilen ist eine Reduzierung um 5 mm zulässig.

Zulassungen in einer Grenzzusammensetzung für die betrachtete Expositionsklasse. Diese Grenzzusammensetzungen sind der Betonnorm DIN 1045-2 entlehnt. Ein entscheidender Parameter ist insbesondere der maximale Wasserzementwert. Bild 16 zeigt Prüfergebnisse von klinkereffizienten Zementen vor dem Bewertungshintergrund des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt). Diese Prüfung ist derzeit mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ durchzuführen. Während sich z.B. ein CEM III/A oder auch ein CEM II/C-M (S-LL) in dieser Prüfung mit der geforderten Grenzzusammensetzung gut in den Bewertungshintergrund einordnen, liegt die Carbonatisierungstiefe eines Zements mit 20 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 50 M.-% ungebranntem Kalkstein deutlich außerhalb.

Senkt man den Wasserzementwert auf $w/z = 0,40$, ergibt sich bereits ein Prüfergebnis im oberen Bereich des Bewertungshintergrunds. Eine weitere Absenkung auf $w/z = 0,35$ führt zu einem Ergebnis in der Größenordnung der Referenzemente. Eine weitere deutliche Reduzierung des Klinkergehalts in Zementen mit hohen Anteilen an ungebranntem Kalkstein wäre somit möglich, wenn die Betone entsprechend zusammengesetzt sind.

Dieses Vorgehen ist mittlerweile in allgemeinen bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen für klinkereffiziente Zemente möglich („Zulassung mit leicht abgesenkten Wasserzementwert“). Zu beachten ist, dass der bisherige Bewertungshintergrund (vgl. Bild 8 und Bild 9, Teil 1 dieses Beitrags) dabei erhalten

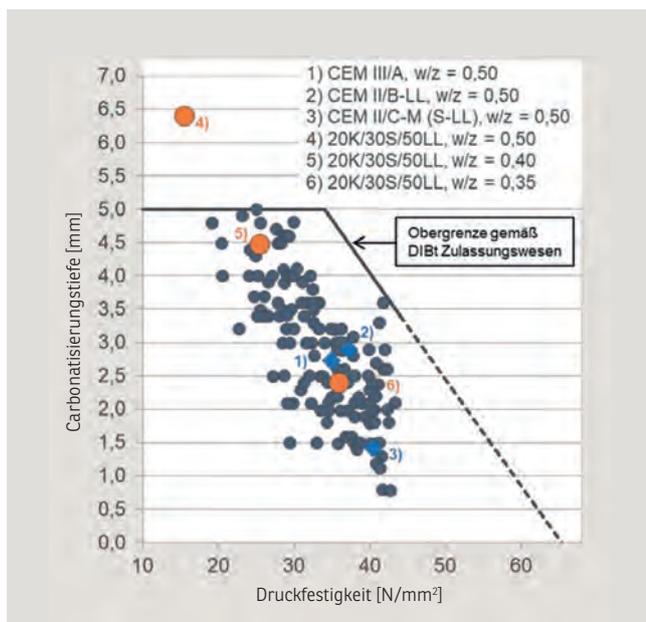


Bild 16: Carbonatisierung Prüfergebnisse von klinkereffizienten Zementen [15] vor dem Bewertungshintergrund des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

bleibt und weiter zur Anwendung kommt. Dieser Bewertungshintergrund hat als Grundlage die aktuell gültigen deskriptiven Regeln. Allerdings enthält auch dieser Bewertungshintergrund nur wenige Datenpunkte mit Zementen mit sehr niedrigem Klinkergehalt (z.B. CEM III/B). Eine Absenkung des Klinkergehalts in dieser Größenordnung bei gleichzeitiger Anpassung der Betonzusammensetzung führt bei gleicher Betonleistungsfähigkeit zu deutlichen CO_2 -Minderungen [15, 16, 2] und unterstützt damit maßgeblich die Klimaschutzziele. Aufbauend auf Zulassungen könnte ein solches Konzept zukünftig auch einmal Einzug in die Betonnorm halten.

Betone mit geringen Klinker- und Wassergehalten sowie hohen Gehalten an ungebranntem Kalkstein wurden bereits in der Praxis erprobt. Beim Bau des EDGE East Side Berlin wurde im 32. und 33. Obergeschoss CO_2 -optimierter Beton verwendet. Die Zusammensetzung des Betons C40/50 wird in Tafel 4 als „Beton 1“ angegeben. Bei einem Vergleich nach CSC-Systeme

Tafel 4: EDGE East Side Berlin, CO_2 -optimierter Beton: Zusammensetzung nach aktueller DIN1045-2 und nach CEM X-Technologie (vgl. auch Tafel 5) [17]

Bestandteil	Concrete standard 2022 "Beton 1"	CEM X-Technologie "Beton 2"
	kg/m ³	
Zement	240 (CEM III/A)	365 (28 M.-% Klinker, 38 M.-% Hüttensand, 34 M.-% Kalkstein)
Kalkstein	125	–
Wasser	127	
w/z	0,53	0,34
Gesteinskörnung	1901	
Zusatzmittel (bezogen auf Zementgehalt)		
Fließmittel	2,0 %	1,2 %

matik wurde für einen C40/50 eine CO_2 -Minderung von etwa 60 % erreicht. Bei einem Vergleich mit durchschnittlichen Werten sind es rd. 50 % Dies liegt daran, dass Beton 1 nur noch einen Anteil von ~ 100 kg Portlandzementklinker pro Kubikmeter aufweist, während ein durchschnittlicher C40/50 in Deutschland einen Klinkergehalt von etwa 260 kg pro Kubikmeter aufweist.

An zwölf Betoniertagen wurden rd. 500 m³ Beton eingebaut. Ein Teil des Betons wurde mit 25 m³/h über eine Distanz von bis zu 285 m gepumpt. Da der Beton einen geringen Wassergehalt hatte, waren der Stabilität gegen Entmischung und der Temperaturempfindlichkeit besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Ein KI-basiertes, begleitendes (Online-)Qualitätssicherungssystem kam zur Anwendung [17, 18]. Für den in den Forschungsvorhaben CEM X genannten Zement (vgl. „Beton 2“ in Tafel 4) liegen heute bereits zwei bauaufsichtliche Zulassungen für Portland-Kalkstein-Hüttenzement vor.

Die Zulassungen enthalten spezifische Anwendungsregeln für den Zement. Ein Ausschnitt ist in Tafel 5 wiedergeben.

5 Zukünftige Ausrichtung des Regelwerks

Das deskriptive Konzept der aktuell gültigen Betonnormen (zuletzt aktualisiert in der neuen Normenreihe DIN 1045:2023) hat sich durchaus bewährt. Zudem ist die Baupraxis bereits heute mit einer großen Anzahl komplexer Regelwerke konfrontiert. Daher sollte es auch zukünftig möglich sein, einen großen Teil üblicher Beton- bzw. Hochbauten nach solch einfachen und robusten Regeln zu erstellen.

Tafel 5: Carbonatisierung XC1-XC4 und Frostwiderstand XF1 (in Klammern Werte der DIN 1045-2:2023) – entnommen Zulassung Z-3.16-2244

Expositionsklasse	XC1	XC2	XC3	XC4	XF1
Höchstzulässiger w/z-Wert	0,75	0,55	0,55	0,45	0,45
	(0,75)	(0,75)	(0,65)	(0,60)	(0,60)
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C16/20	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37
	(C16/20)	(C16/20)	(C20/25)	(C25/30)	(C25/30)
Mindestzementgehalt in kg/m ³	240	280	280	350	350
	(240)	(240)	(260)	(280)	(280)
Andere Anforderungen	–				F4 ¹⁾

¹⁾ Anforderung an den Frostwiderstand der Gesteinskörnung

Deskriptive Regeln	Performance-Ansatz
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> Allgemeingültige Regeln, oftmals basierend auf langjährigen Erfahrungen in der Praxis Relativ einfach und transparent Geringer Aufwand für die Prüfung bei Zement- bzw. Betonherstellung 	<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> Höhere Flexibilität durch individuellen Nachweis ohne periodische Revision des Regelwerks Bei sinnvoller Ausgestaltung ggf. effizientere Nutzung der verfügbaren Ressourcen Wird vielfach als einfachere Möglichkeit zur Einführung von Innovationen angesehen
<p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> Aufgrund bestimmter Annahmen in bestimmten Fällen ggf. über- oder unterdimensioniert Bestimmte Anwender „misstrauen“ den allgemeinen Regeln und fordern einen differenzierten Ansatz 	<p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> Höherer Aufwand für Prüfung und Leistungsnachweis; Kompetenznachweis Zum Teil noch keine Anerkennung von Prüfmethode bzw. -kriterien durch alle Stakeholder In der Regel Einzelfalllösung; nicht allgemeingültig

Bild 17: Vor- und Nachteile deskriptiver und leistungsbasierter Ansätze [19]

Die Einführung leistungsbezogener Nachweise als Ergänzung bzw. Alternative zu den deskriptiven Regeln der Normen des Betonbaus kann eine sinnvolle Ergänzung darstellen. Betonhersteller könnten ihre Betonzusammensetzungen im Hinblick auf eine Reduzierung der CO₂-Emissionen und den Ressourceneinsatz optimieren, ohne dass die Dauerhaftigkeit der Betonbauwerke in Frage gestellt wird. Ob die bislang diskutierte Grenz-

werte bzw. Klassen (XRC5 bis XRC9) für ein solches „Performancekonzept“ das gesamte Spektrum des nach dem gültigen deskriptivem Regelwerk möglicher Zemente und Betone sicher abbilden, kann auf Grund der verfügbaren Datenlage nicht abschließend beurteilt werden.

Das Regelwerk des Betonstraßenbaus z.B. sieht seit einigen Jahren zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-

Innenbauteile in Expositionsklasse XC1 (trocken)		<ul style="list-style-type: none"> Geeignete (robuste) Frischbetoneigenschaften Druckfestigkeit und weitere mechanische Eigenschaften
„Normale“ Außenbauteile - XC2, XC3, XC4, XF1, XS/D1, XA1		<ul style="list-style-type: none"> Geeignete (robuste) Frischbetoneigenschaften Druckfestigkeit und weitere mechanische Eigenschaften Wenn nachgewiesen: "Festigkeit als Indikator für Dauerhaftigkeit"
Erhöhte Anforderungen (z.B. Chloridangriff XS/D 2/3, Frostangriff XF2-XF4)		<ul style="list-style-type: none"> Geeignete (robuste) Frischbetoneigenschaften Druckfestigkeit und weitere mechanische Eigenschaften Dauerhaftigkeitsprüfungen (Festigkeit ≠ Dauerhaftigkeit)
Weitere mögliche Anforderungen abhängig vom Anwendungsgebiet		<ul style="list-style-type: none"> Betonwaren Fertigteile Estrich (Sackzement) für Industrieböden Geotechnische Anwendungen Betonstraßen Bahnschwellen

Bild 18: Mögliche Einteilung der Leistungsmerkmale je nach Einsatzgebiet

Tafel 6: Informationen zu den Betonen aus Abschnitt 4.1

Leimgehalt, rd.	w	Zementzusammensetzung					Zementart	Klinkerfaktor	w/z	Carbonatisierungsrate
		Zementgehalt	K	S	V	LL				
l/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³			mm/va	
280	169	260	260				CEM I	1,00	0,65	4,5
280	169	260	260				CEM I	1,00	0,65	2,7
280	169	260	260				CEM I	1,00	0,65	4,1
280	169	260	260				CEM I	1,00	0,65	4,1
330	198	335	325				CEM I	0,97	0,59	3,6
330	198	335	325				CEM I	0,97	0,59	3,7
330	198	335	325				CEM I	0,97	0,59	3,2
330	198	335	325				CEM I	0,97	0,59	3,0
310	192	300	291				CEM I	0,97	0,64	3,9
310	192	300	291				CEM I	0,97	0,64	3,9
310	192	300	291				CEM I	0,97	0,64	4,1
310	192	300	291				CEM I	0,97	0,64	3,6
320	175	380	361				CEM I	0,95	0,46	2,1
320	175	380	361				CEM I	0,95	0,46	1,3
320	175	380	361				CEM I	0,95	0,46	1,3
320	175	380	361				CEM I	0,95	0,46	1,3
300	173	320	304				CEM I	0,95	0,54	3,0
300	173	320	304				CEM I	0,95	0,54	2,4
300	173	320	304				CEM I	0,95	0,54	2,3
300	173	320	304				CEM I	0,95	0,54	2,0
320	175	380	330,6	49,4			CEM II/A-S	0,87	0,46	1,2
330	198	335	291,5	43,5			CEM II/A-S	0,87	0,59	3,7
310	192	300	261	39			CEM II/A-S	0,87	0,64	3,9
300	173	320	278,4	41,6			CEM II/A-S	0,87	0,54	2,7
320	175	380	311,6			68,4	CEM II/A-LL	0,82	0,46	2,4
300	173	320	262,4			57,6	CEM II/A-LL	0,82	0,54	3,4
330	198	335	274,7			60,3	CEM II/A-LL	0,82	0,59	4,1
310	192	300	246			54	CEM II/A-LL	0,82	0,64	4,2
280	169	260	208	52			CEM II/A-S	0,80	0,65	4,7
280	169	260	208			52	CEM II/A-LL	0,80	0,65	6,9
320	175	380	304	76			CEM II/A-S	0,80	0,46	1,0
300	173	320	256	64			CEM II/A-S	0,80	0,54	3,0
330	198	335	268	67			CEM II/A-S	0,80	0,59	4,0
310	192	300	240	60			CEM II/A-S	0,80	0,64	4,9
280	169	260	195			65	CEM II/B-LL	0,75	0,65	6,1
280	169	260	182		39	39	CEM II/B-M (V-LL)	0,70	0,65	5,6
280	169	260	182		39	39	CEM II/B-M (V-LL)	0,70	0,65	5,5
280	169	260	182	39		39	CEM II/B-M (S-LL)	0,70	0,65	6,6
280	169	260	182			78	CEM II/B-LL	0,70	0,65	5,6
280	169	260	182			78	CEM II/B-LL	0,70	0,65	4,8
280	169	260	182			78	CEM II/B-LL	0,70	0,65	4,9
280	169	260	182			78	CEM II/B-LL	0,70	0,65	4,0
280	169	260	182			78	CEM II/B-LL	0,70	0,65	5,4
280	169	260	182			78	CEM II/B-LL	0,70	0,65	2,8
320	175	380	258,4	121,6			CEM II/B-S	0,68	0,46	1,8
300	173	320	217,6	102,4			CEM II/B-S	0,68	0,54	3,3

Leimgehalt, rd.	w	Zementzusammensetzung					Zementart	Klinkerfaktor	w/z	Carbonatisierungsrate
		Zementgehalt	K	S	V	LL				
l/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³			mm/√a	
330	198	335	227,8	107,2			CEM II/B-S	0,68	0,59	4,1
310	192	300	204	96			CEM II/B-S	0,68	0,64	4,9
320	175	380	250,8	129,2			CEM II/B-S	0,66	0,46	2,9
300	173	320	211,2	108,8			CEM II/B-S	0,66	0,54	4,0
330	198	335	221,1	113,9			CEM II/B-S	0,66	0,59	5,2
310	192	300	198	102			CEM II/B-S	0,66	0,64	6,1
280	169	260	169			91	CEM II/B-LL	0,65	0,65	6,0
280	169	260	169	91			CEM II/B-S	0,65	0,65	3,8
280	169	260	169		91		CEM II/B-V	0,65	0,65	4,9
280	169	260	169			91	CEM II/B-LL	0,65	0,65	4,2
280	169	260	169	13		78	CEM II/B-M (S-LL)	0,65	0,65	7,5
280	169	260	169	26		65	CEM II/B-M (S-LL)	0,65	0,65	7,0
280	169	260	169	39		52	CEM II/B-M (S-LL)	0,65	0,65	5,4
280	169	260	169	39		52	CEM II/B-M (S-LL)	0,65	0,65	5,3
320	175	380	243,2	136,8			CEM III/A	0,64	0,46	2,0
300	173	320	204,8	115,2			CEM III/A	0,64	0,54	3,5
330	198	335	214,4	120,6			CEM III/A	0,64	0,59	4,5
310	192	300	192	108			CEM III/A	0,64	0,64	5,9
280	169	260	156	52	52		CEM II/B-M (S-V)	0,60	0,65	8,7
280	169	260	156		52	52	CEM II/B-M (V-LL)	0,60	0,65	7,7
280	169	260	156	52		52	CEM II/B-M (S-LL)	0,60	0,65	6,3
320	175	380	224,2	155,8			CEM III/A	0,59	0,46	2,0
300	173	320	188,8	131,2			CEM III/A	0,59	0,54	3,4
330	198	335	197,7	137,4			CEM III/A	0,59	0,59	4,7
310	192	300	177	123			CEM III/A	0,59	0,64	5,7
280	169	234	130	52		52	CEM II/C-M (S-LL)	0,56	0,72	7,3
320	175	380	201,4	178,6			CEM III/A	0,53	0,46	3,0
300	173	320	169,6	150,4			CEM III/A	0,53	0,54	4,4
330	198	335	177,6	157,5			CEM III/A	0,53	0,59	5,5
310	192	300	159	141			CEM III/A	0,53	0,64	6,1
320	175	380	193,8	186,2			CEM III/A	0,51	0,46	3,3
300	173	320	163,2	156,8			CEM III/A	0,51	0,54	4,9
330	198	335	170,9	164,2			CEM III/A	0,51	0,59	6,2
310	192	300	153	147			CEM III/A	0,51	0,64	6,3
320	175	380	193,8	186,2			CEM III/A	0,51	0,46	2,7
300	173	320	163,2	156,8			CEM III/A	0,51	0,54	4,4
330	198	335	170,9	164,2			CEM III/A	0,51	0,59	5,5
310	192	300	153	147			CEM III/A	0,51	0,64	5,7
280	169	260	130	65	65		CEM II/C-M (S-V)	0,50	0,65	8,2
280	169	260	130	78		52	CEM II/C-M (S-LL)	0,50	0,65	7,0
280	169	260	130	104		26	CEM II/C-M (S-LL)	0,50	0,65	6,9
280	169	260	130	104		26	CEM II/C-M (S-LL)	0,50	0,65	6,1
320	175	380	182,4	197,6			CEM III/A	0,48	0,46	3,0
300	173	320	153,6	166,4			CEM III/A	0,48	0,54	4,3
310	192	300	144	156			CEM III/A	0,48	0,64	6,1
330	198	335	160,8	174,2			CEM III/A	0,48	0,59	5,1

Anteil Klinker [M.-%]	Transportbeton	Betonwaren	Spezialtiefbau	Estrich (Sackware) Industriebetonböden	Konstruktive Fertigteile	Betonfahrbahndecken	Bahnschwellen
95...100	Anwendung nach Expositions-klassen: XS/XD2-3, XF2-XF4	CEM I	Leichte Mischbarkeit Zement und Wasser zu Suspensionen	Trocknungsverhalten	CEM I	CEM I	Festigkeit
95...94	Dauerhaftigkeitsnachweis	CEM II/A	Geringes Schwindverhalten und geringe Sedimentationsneigung	CEM I/A	Schnelle Festigkeitsentwicklung	Frost-Tausalz-Widerstand	AKR-Widerstand
65...79	XC3, XC4/XF1, XS/D1	CEM II/B	Gute Fließ- und Pumpfähigkeit	CEM II/B	CEM II/B	CEM II/B	CEM II/B
50...64	Druckfestigkeit = Dauerhaftigkeit	CEM III/A CEM II/C		CEM III/A CEM II/C	CEM III/A	CEM III/A CEM II/C	
35...64	Robuste Frischbetoneigenschaften Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)	CEM III/A CEM V		CEM V			
20...34		CEM III/B					

Bild 19: Klinkereffiziente Zemente in verschiedenen Anwendungen [20]

Reaktion Performanceprüfungen der Betone vor. Ähnlich ist es bei Bahnschwellen. In beiden Fällen leisten diese Konzepte gute Dienste: Seit ihrer Einführung werden Schäden sicher vermieden. Dies ist ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Verwendung des Betons. Die Vor- und Nachteile deskriptiver und leistungsbezogener Ansätze werden intensiv diskutiert. Einen Überblick über Vor- und Nachteile der Konzepte gibt Bild 17.

Ein großer Teil des Ortbetons wird für Innen- und „normale“ Außenbauteile (Expositionsklassen XC1 trocken, XC2, XC3, XC4, XF1) verwendet. Hierfür werden geeignete (robuste) Frischbetoneigenschaften und eine angemessene schnelle Druckfestigkeitsentwicklung benötigt. In einigen Fällen kann die Festigkeit als Indikator für die Dauerhaftigkeit herangezogen werden; zum Beispiel in gewissem Maße bei Carbonatisierung. Dies ist hilfreich im Hinblick auf den Konformitätsnachweis in der täglichen Praxis. Weitere Entwicklungen in der Zement- und Betonnormung sollten einfache und robuste Steuerungen für die meisten Anwendungen mit geringen oder mittleren Anforderungen ermöglichen.

Bei starker Beanspruchung (Expositionsklassen XF2/XF3/XF4, XD2/XD3, XS2/XS3, XA2, XA3) sind in der Regel Leistungsnachweise erforderlich. Die Festigkeit gibt hier meist keinen

direkten Hinweis auf die Dauerhaftigkeit in den entsprechenden Nachweisen im Labor. Eventuell sind weitere Anforderungen je nach Einsatzgebiet, z.B. für Fertigteile, Estrich oder im Betonstraßenbau zu beachten.

Zur Bewältigung zukünftiger Herausforderungen bezüglich Klimaschutz und Ressourceneffizienz werden leistungsbezogene Nachweise vielfach als Chance gesehen, deskriptive Ansätze wegen ihrer höheren Flexibilität bei der Anwendung neuer technischer Lösungen zu ergänzen oder ggf. auch zu ersetzen. Die Herausforderung wird wohl tatsächlich darin bestehen, einen geeigneten Mix aus einfachen und robusten deskriptiven Regelungen und sowie leistungsbezogenen Ansätzen zu finden. Weiterentwicklungen in der Zement- und Betonnormung sollten einfache und robuste Regeln für die Hauptanwendungsgebiete mit geringen bis zu moderaten Anforderungen sowie der Anwendung angemessener Nachweise bei besonderen Anforderungen bzw. hoher Beanspruchung bereithalten. Eine mögliche Abstufung ist angegeben in Bild 18.

Nicht in allen Anwendungsbereichen zementgebundener Baustoffe wird sich der Klinkergehalt in Zement und Beton in ähnlicher Weise wie im üblichen Hochbau reduzieren lassen. Das Bild 19 ist gleichermaßen der Versuch einer Bestandaufnahme

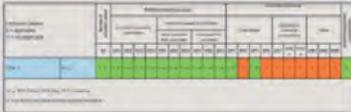
1	Hauptzementarten		<ul style="list-style-type: none"> Robuste und einfache deskriptive Regeln für die (zukünftigen) Hauptzementarten z.B. CEM II/C mit 50 M.-% Klinker, 30 M.-% X, 20 M.-% LL
2	CEM X		<ul style="list-style-type: none"> Spezifische Regeln für Zemente mit sehr geringen Klinkergehalten Angepasster w/z in der jeweiligen Expositions-klasse z.B. CEM X mit 30 M.-% Klinker, 30 M.-% X, 40 M.-% LL
3	Leistungsbezogene Nachweise des Betons für verschiedene Anwendungen		<ul style="list-style-type: none"> Dauerhafte, CO₂- und ressourcenoptimierte Betone unter Verwendung regionaler Roh- und Ausgangsstoffe – "tailor made concrete" Nachweis der Leistungsfähigkeit neuer CO₂-effizienter Zemente und Betone im „Tagesgeschäft“.

Bild 20: Zukünftige Elemente der Normung von Zement und Beton

wie auch des Ausblicks im Hinblick auf die Möglichkeiten der Optimierung des Portlandzementklinkeranteils und damit der Portfolioentwicklung für verschiedene Anwendungsbereiche. Der Klinkergehalt wird teilweise durch Anforderungen an z.B. Festigkeit, Carbonatisierungswiderstand oder Frost-Tausalz-Widerstand bestimmt. Die Zementarten sind als generische Beispiele zu verstehen. Bezüglich der unterschiedlichen Zementzusammensetzungen (Hüttensand, Flugasche, ungebrannter Kalkstein, calcinierte Tone, rezyklierte Feinanteile etc.) kann sich ein differenzierteres Bild ergeben.

Eine weitere deutliche Reduzierung des Klinkergehalts in Zementen mit hohen Anteilen an ungebranntem Kalkstein wäre möglich, wenn die Betone entsprechend zusammengesetzt sind. Der dritte „Baustein“ neben den robusten und einfachen deskriptiven Regeln für die (zukünftigen) Hauptzementarten, z.B. CEM II/C mit 50 M.-% Klinker, 30 M.-% X, 20 M.-% LL, und den leistungsbezogenen Nachweisen des Betons für verschiedene Anwendungen sind daher spezifische Regeln für Zemente mit sehr geringen Klinkergehalten; sprich ein angepasster w/z-Wert in der jeweiligen Expositionsklasse. So wie diese bereits in Zulassungen für Portland-Kalkstein-Hüttenzemente praktiziert wird. Bild 20 fasst dies zusammen.

6 Hintergrundinformationen

Tafel 6 enthält Hintergrundinformationen zu den Betonen aus Abschnitt 4.1.

Literatur

[1] Model Code for Service Life Design. fib Bulletin 34, International Federation for Structural Concrete, Lausanne 2006
 [2] Dekarbonisierung von Zement und Beton: Minderungspfade und Handlungsstrategien; Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie. Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf 2020
 [3] DIBt Zulassungsverzeichnis. <https://www.dibt.de/de/service/zulassungsdownload/zulassungs-und-genehmigungsverzeichnisse>
 [4] Wierig, Hans-Joachim: Longtime Studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure. Proceedings of the Rilem Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure: Regulations, test methods, assessment criteria, research results, Hannover 1984, pp. 239–249

[5] Hunkeler, F.; Lammar, L.: Anforderungen an den Carbonatisierungswiderstand von Betonen. Forschungsauftrag AGB 2008/012 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB), Bern 2012
 [6] CEN/TR 16563:2013 „Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit“
 [7] Durability design of concrete pavements - Guide for structural and durability design of concrete pavements, DuraCrete probabilistic performance based durability design of concrete Structures, 2000
 [8] Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Beuth Verlag, Berlin 2000
 [9] Positionspapier des DAFStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1. Ernst & Sohn, Berlin 2008
 [10] Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC). Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2019
 [11] Müller, C.: Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttensand und Flugasche. beton 59 (2009) H. 10, S. 469–478, und H. 11, S. 531–537
 [12] Greve-Dierfeld, S. von: Bemessung auf Dauerhaftigkeit mit Teilsicherheitsbeiwerten bzw. mit qualifiziert abgesicherten deskriptiven Regeln einschließlich dazugehörigem Benchmark mit britischen und deutschen Regeln. TUM-Forschungsbericht 30-F-0018, München 2010
 [13] Gehlen, C.; Schießl, P.; Schießl-Pecka, A.: Hintergrundinformationen zum Positionspapier des DAFStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J, für dauerhaftigkeitsrelevante Problemstellungen. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008) H. 12, S. 840–851
 [14] D209 – Konzeptvorschlag „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem System der Expositions widerstandsklassen“. DAFStb UA Dauerhaftigkeit, Berlin 2023
 [15] Palm, S.; Müller, C.; Proske, T.; Rezvani, M.; Graubner, C.-A.: Concrete application of clinker-efficient cements. Advances in Cement Research (2019) No. 5, pp. 225–234
 [16] Müller, C.; Palm, S.; Graubner, C.-A.; Proske, T.; Hainer, S.; Rezvani, M.; Neufert, W.; Reuken, I.: Zemente mit hohen Kalksteingehalten – Dauerhaftigkeit und praktische Umsetzbarkeit. beton 64 (2014) H. 1+2, S. 43–50
 [17] CO₂-reduzierter Beton für Berliner Vorzeigebau EDGE East Side. www.meistertipp.de/aktuelles/co2-reduzierter-beton-fuer-berliner-vorzeigebau-edge-east-side/, abgerufen am 07.08.2023
 [18] Spinner, L. Die nächste Stufe klinkereffizienter Betone – In der Praxis skalierbar herstellbar? Jahrestagung Zement 2022 des VDZ, Düsseldorf 2022
 [19] CEN/TC 250/SC 2 N 2073 - ERC N 080 JCP Annex 2 CEN/TC 104/WG 19 N 045 Draft CEN/TR Sustainable building with concrete PART 2 (2022-08-15)
 [20] Müller, C.: Einsatz CO₂-reduzierter Zemente in der Baupraxis. BFT International 89 (2023) H. 6, S. 74

BAUSTOFFPRÜFSYSTEME

CEMENT / MORTAR / GYPSUM TESTING



LUFTGEHALTSPRÜFER
 Drucktasten zur einfachen Versuchsdurchführung
 Manometer integriert
 Schnellspannverschlüsse
 Gemäß DIN EN 1015-7, DIN EN 459-2 bzw. DIN EN 413-2
NEU: Schnellkalibriersatz

BESTIMMUNG DES LUFTPORENGEHALTS
 in Zementleim, Mörtel sowie Putz- und Mauerbinder

**FÜR FORSCHUNG, QUALITÄTSÜBERWACHUNG
 UND MATERIALPRÜFUNG**

*TRUST IS GOOD,
 TESTING IS BETTER!*




TESTING Blum & Feuerherdt GmbH
 T +49 (0)30 710 96 45 0
www.testing.de • info@testing.de