

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	25	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.

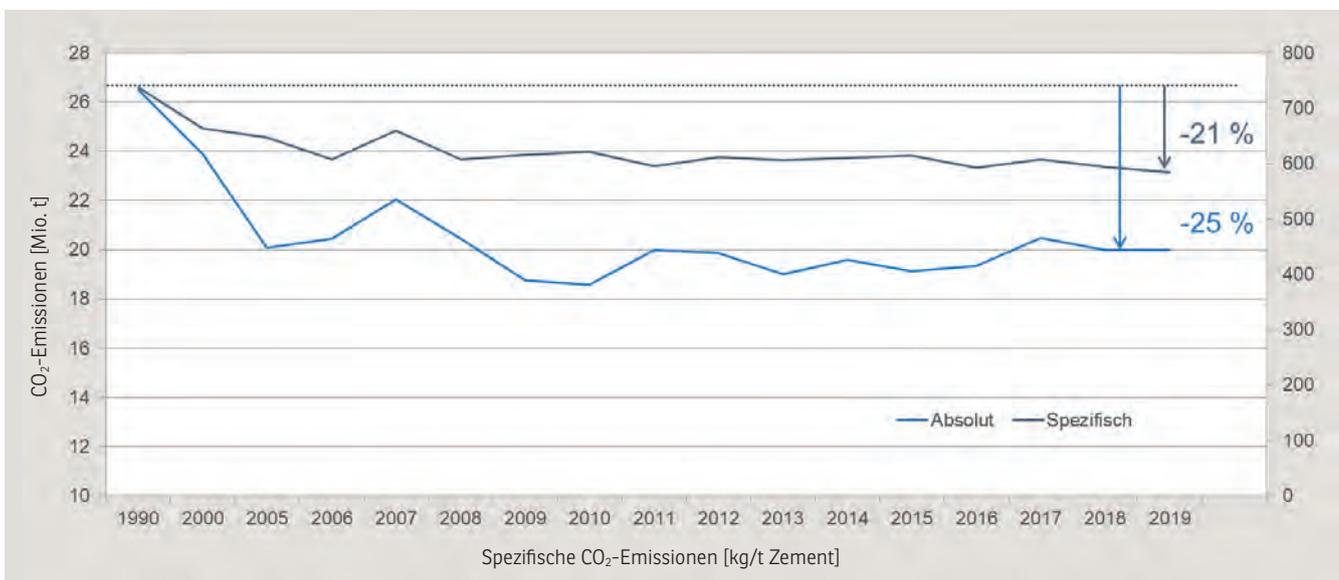


Bild 2: CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie [2] (Quellen: VDZ, GNR, Deutsche Emissionshandelsstelle)

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).

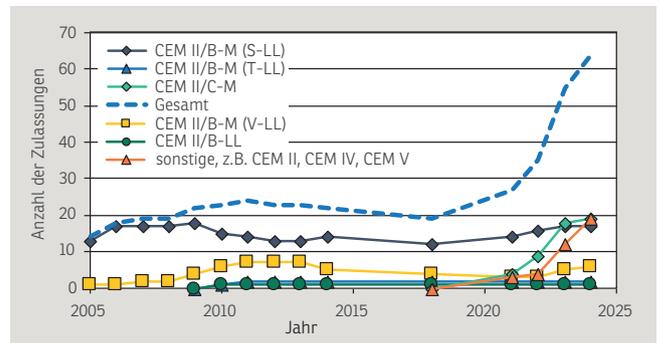


Bild 4: Entwicklung der Anzahl der Bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen der vergangenen Jahre [3]

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

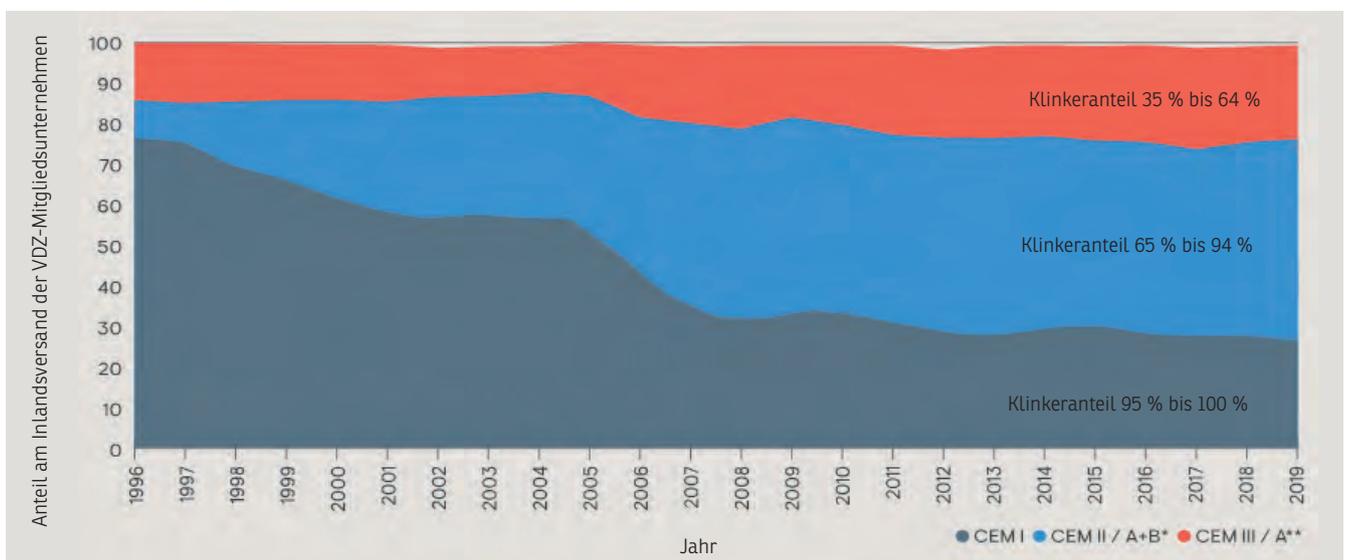


Bild 3: Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der vergangenen Jahre [2]

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

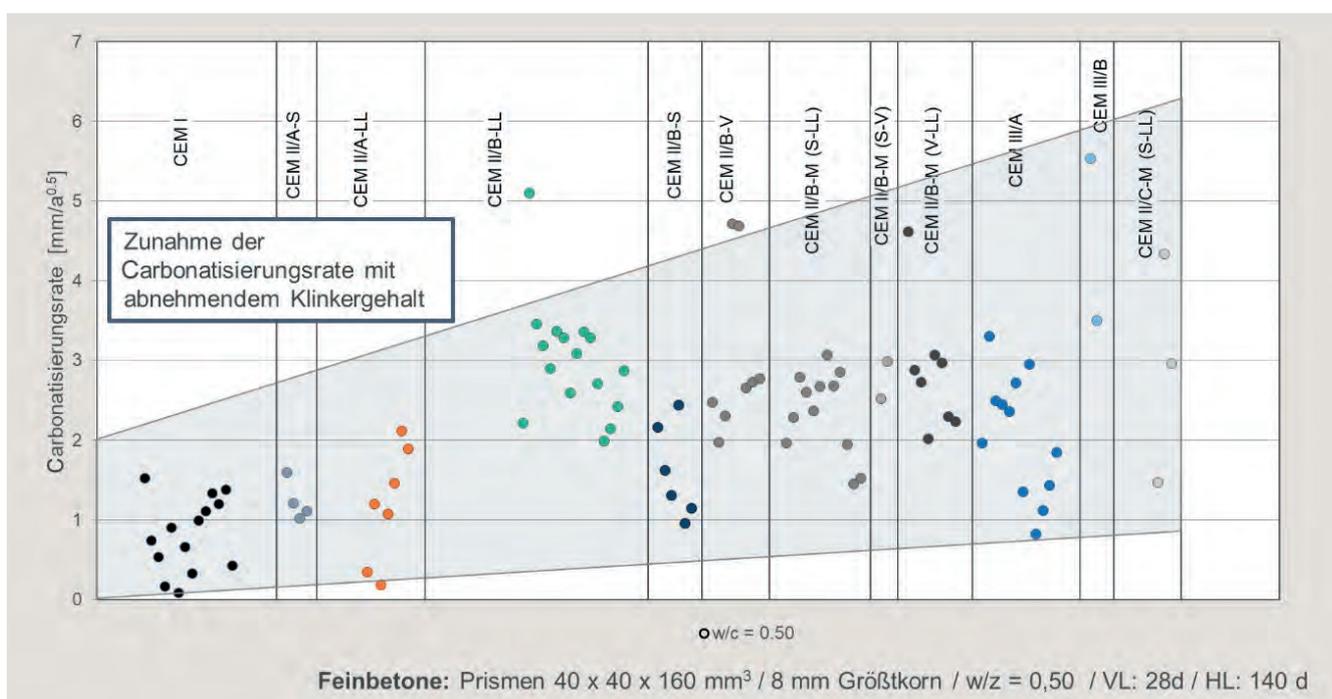


Bild 6: Carbonatisierungsraten in Laborprüfungen bei Verwendung verschiedener Zemente/Zementarten (Quelle: VDZ)

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.

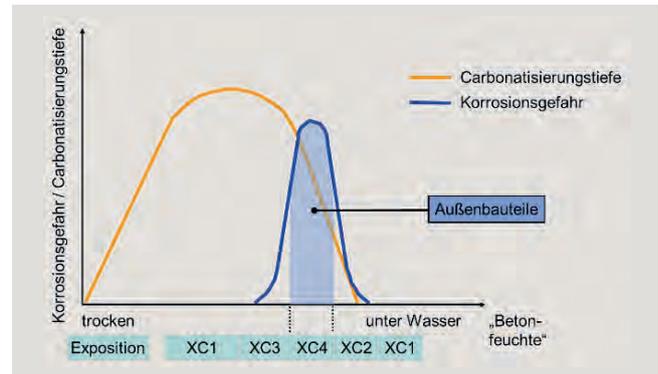
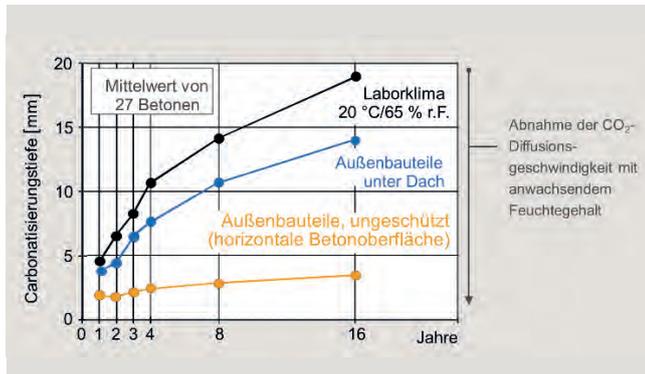


Bild 7: Carbonatisierung und Korrosionsgefahr: Einfluss der Umgebungsbedingungen (Quellen: links [4], rechts in Anlehnung an [5])

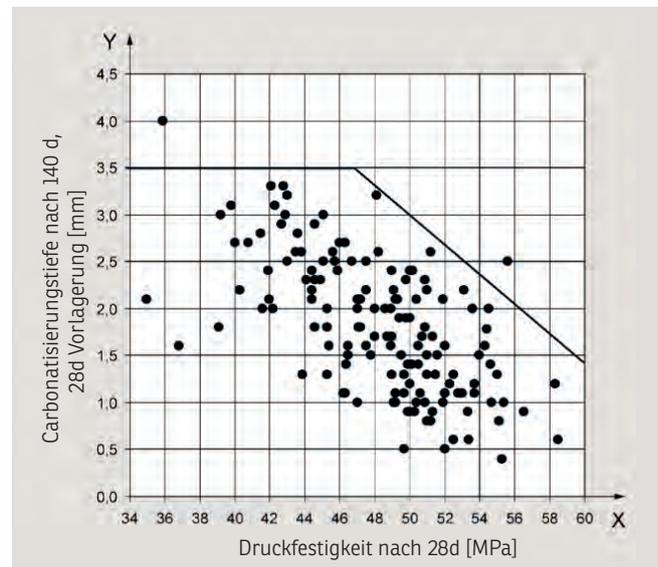
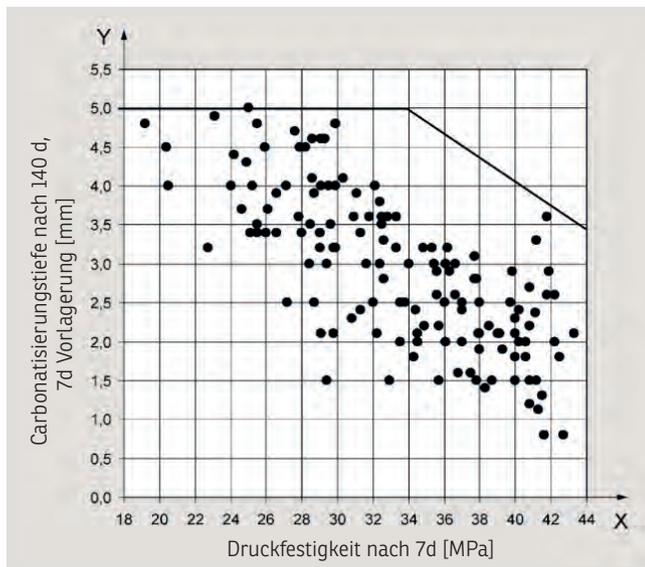


Bild 8: Bewertungshintergrund für Carbonatisierung (hier: Carbonatisierungstiefe) in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt [6]

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.

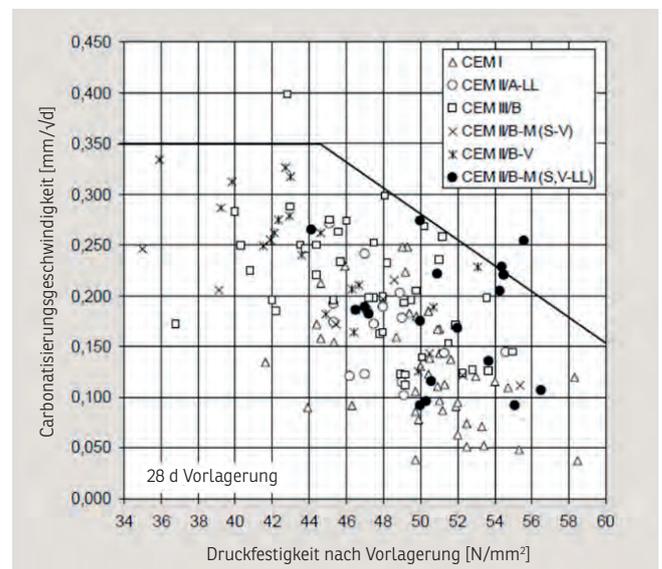
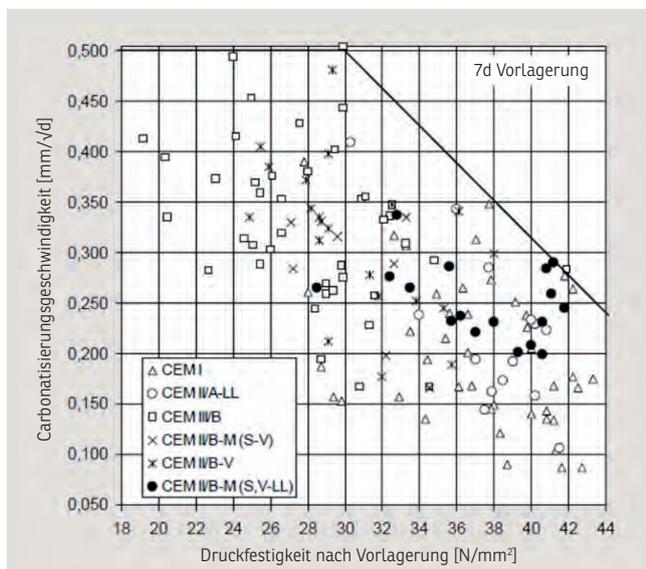


Bild 9: Bewertungshintergrund für Carbonatisierung (hier: Carbonatisierungsrate in mm/Öd) in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt [6]

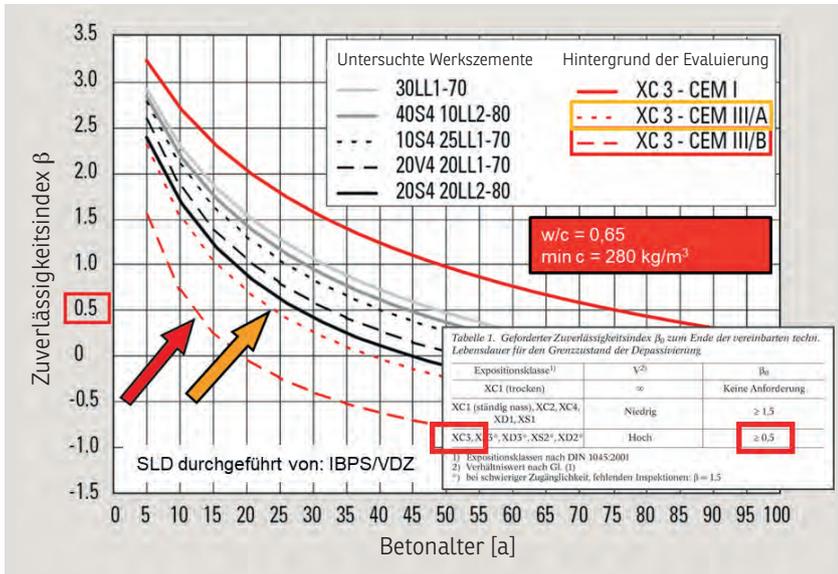


Bild 10: Ergebnis von Lebensdauerbetrachtungen (Grenzstand der Depassivierung in der Expositionsklasse XC3) [11]

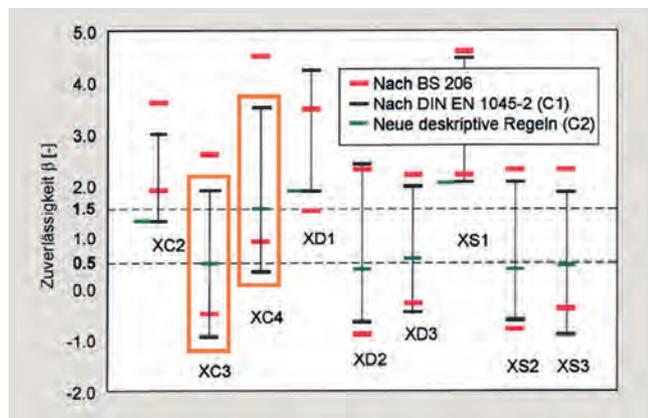


Bild 11: Zuverlässigkeiten bzgl. des Grenzstands der Depassivierung der Bewehrung nach [12]

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.