

# Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel Zement

Christoph Müller

DAfStb Fachkolloquium „Ressourcenverfügbarkeit –  
Konsequenzen für das Bauen mit Beton in der Zukunft“

Berlin, 18.09.2019

# Überblick

- Rohstoffeinsatz in der Zementindustrie
- Herausforderung Klimaschutz
- Weiterentwicklung der Zementnorm EN 197-1
- Eigenschaften von Betonen mit neuen, klinkereffizienten Zementen



# Rohstoffeinsatz der Zementindustrie in Deutschland

Rohstoffeinsatz in 1.000 t		2014	2015	2016	2017	2018 <sup>6)</sup>
Gruppe	Rohstoff					
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide	37.912	36.858	37.194	39.391	38.614
	Sonstige <sup>1)</sup>	75	81	70	81	75
Si	Sand	1.139	1.096	1.122	1.174	1.068
	Gießereialsand	147	178	160	182	204
Si-Al	Ton	1.295	1.150	1.305	1.184	1.168
	Betonit / Kaolinit	35	26	22	16	21
Fe	Eisenerz	126	115	128	149	160
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie <sup>2)</sup>	103	95	92	93	69
Si-Al-Ca	Hüttensand <sup>3)</sup>	6.948	6.821	7.244	7.896	7.696
	Flugasche	313	341	283	243	253
	Ölschiefer	118	113	136	123	145
	Trass	31	32	32	38	35
	Sonstige <sup>4)</sup>	46	58	49	23	57
S	Natürlicher Gips	808	734	714	781	809
	Natürlicher Anhydrit	477	533	628	667	642
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung	321	301	325	290	257
Al	Einsatzstoffe aus der Metallindustrie <sup>5)</sup>	60	28	44	37	27

<sup>1)</sup> Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung, Kalkhydrat, Porenbetongranulat, Calciumfluorid

<sup>2)</sup> Kiesabbrand, verunreinigtes Erz, Eisenoxid/Flugasche-Gemisch, Stahlwerksstäube, Walzzunder

<sup>3)</sup> FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V.

<sup>4)</sup> Papierreststoffe, Aschen aus Verbrennungsprozessen, Mineralische Reststoffe (z.B. ölverunreinigte Böden)

<sup>5)</sup> Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken, Aluminiumhydroxid <sup>6)</sup> teilweise geschätzt

# Rohstoffeinsatz der Zementindustrie in Deutschland

Rohstoffeinsatz in 1.000 t		2018 <sup>6)</sup>
Gruppe	Rohstoff	
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide	38.614
	Sonstige <sup>1)</sup>	75
Si	Sand	1.068
	Gießereialsand	204
Si-Al	Ton	1.168
	Betonit / Kaolinit	21
Fe	Eisenerz	160
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie <sup>2)</sup>	69
Si-Al-Ca	Hüttensand <sup>3)</sup>	7.696
	Flugasche	253
	Ölschiefer	145
	Trass	35
	Sonstige <sup>4)</sup>	57
S	Natürlicher Gips	809
	Natürlicher Anhydrit	642
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung	257
Al	Einsatzstoffe aus der Metallindustrie <sup>5)</sup>	27

Klinker: 24.469 (1.000 t)  
 Zement: 33.665 (1.000 t)  
 Klinker/Zement-Faktor: 0,71

<sup>1)</sup> Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung, Kalkhydrat, Porenbetongranulat, Calciumfluorid

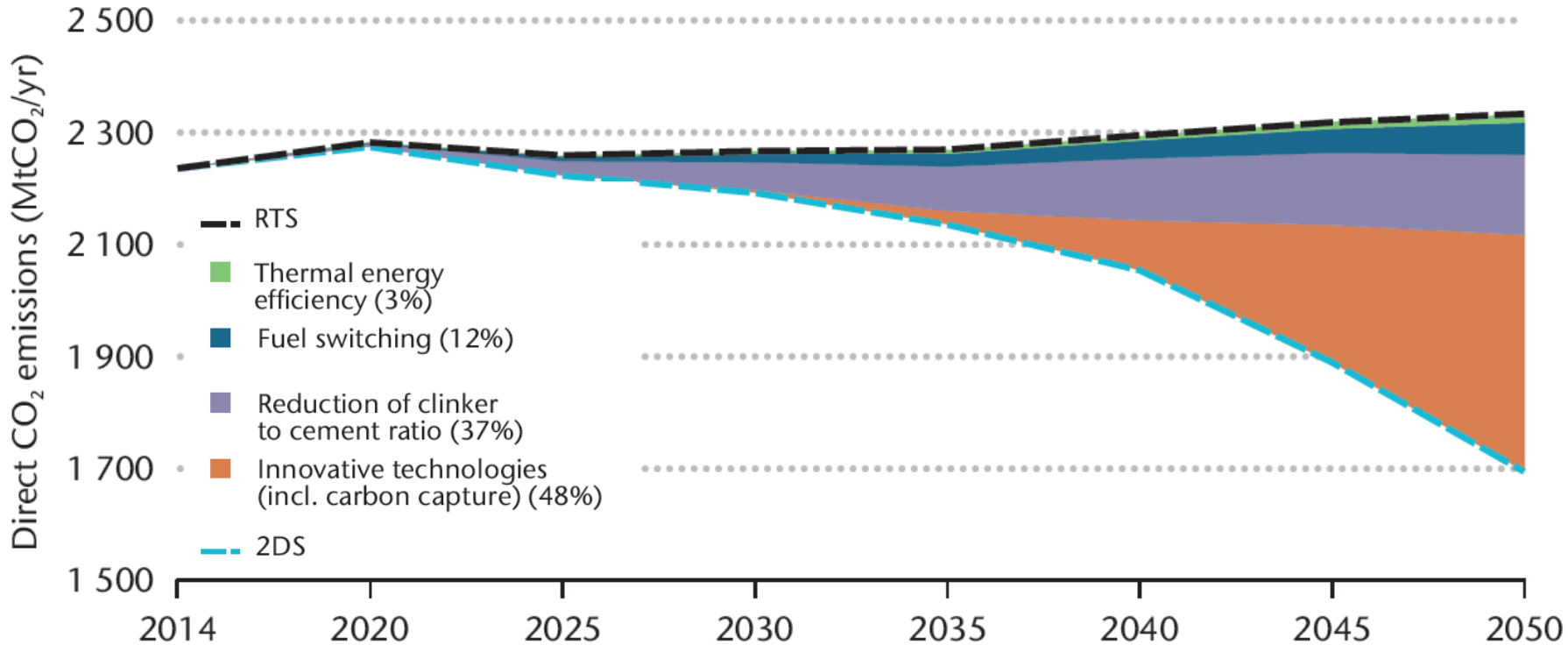
<sup>2)</sup> Kiesabbrand, verunreinigtes Erz, Eisenoxid/Flugasche-Gemisch, Stahlwerksstäube, Walzzunder

<sup>3)</sup> FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V.

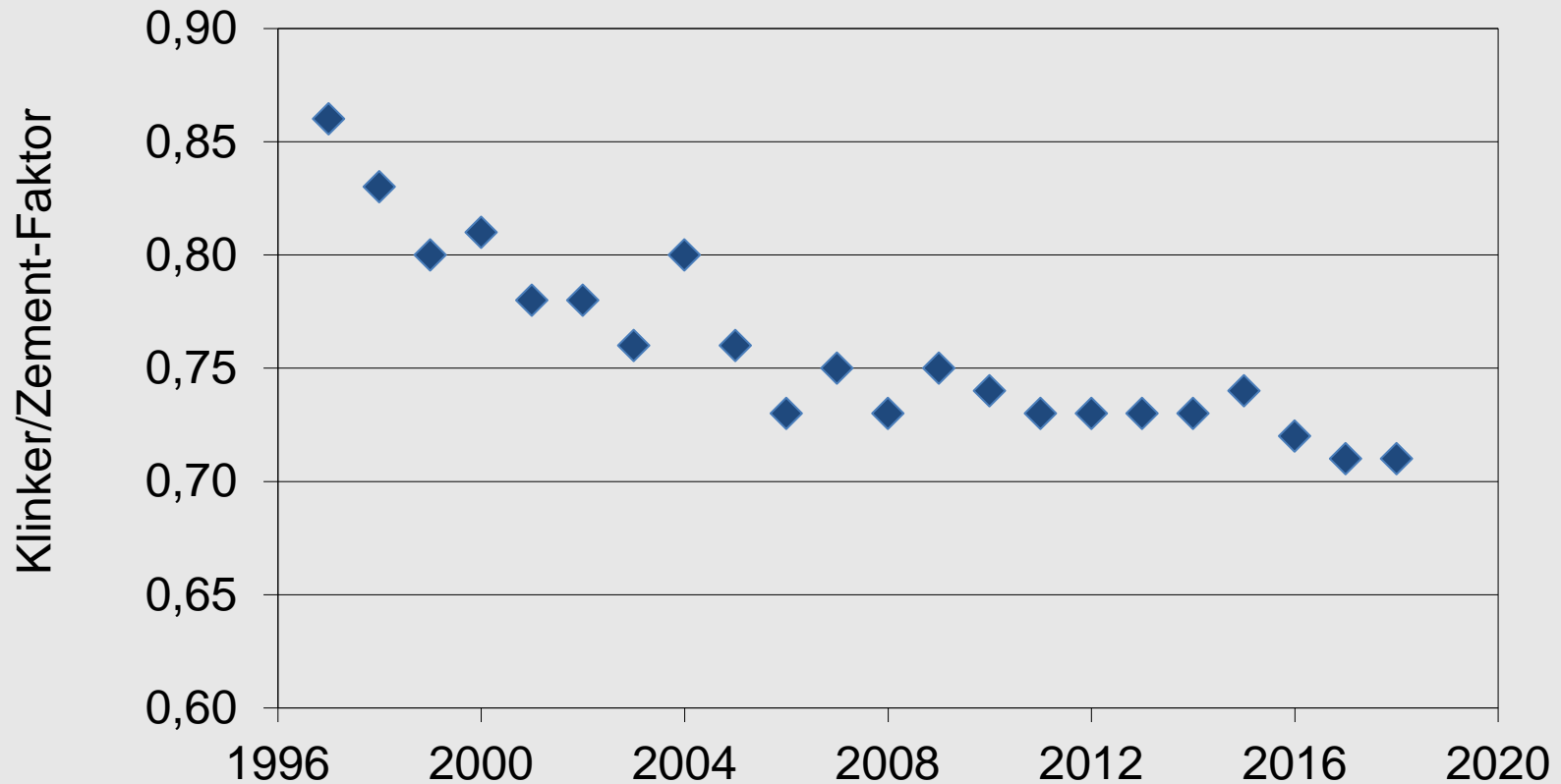
<sup>4)</sup> Papierreststoffe, Aschen aus Verbrennungsprozessen, Mineralische Reststoffe (z.B. ölverunreinigte Böden)

<sup>5)</sup> Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken, Aluminiumhydroxid <sup>6)</sup> teilweise geschätzt

# CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale Zementindustrie bis 2050



# Entwicklung des Klinker/Zement-Faktors DE



Quelle: VDZ

# Welche Eigenschaften sind relevant?

Anwendung/Baufaufgabe
Innenbauteile in Expositionsklasse <b>XC1 (trocken)</b>
Bauteile in Expositionsklasse XC3 oder Außenbauteile in Expositionsklassen <b>XC4/XF1</b>



Druckfestigkeitsklasse	Anteil in % Deutschland 2016	min. C in Expositionsklasse
C8/10	1.0	X0
C12/15	6.8	---
C16/20	1.9	<b>XC1, XC2</b>
C20/25	14.4	<b>XC3</b>
C25/30	39.8	<b>XC4, XF1, XF2, XF3, XA1</b>
C30/37	21.4	XS1, XD1, XF4
C35/45	11.2	XS/D 2, 3, XA 2,3
C45/55	0.6	---
C50/60	0.3	---

~ 64 % = 32 Mio m<sup>3</sup>

# Welche Eigenschaften sind relevant?

Anwendung/Baufaufgabe	Relevante Eigenschaften
Innenbauteile in Expositionsklasse <b>XC1 (trocken)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Robuste Frischbetoneigenschaften</li> <li>▪ Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)</li> </ul>
Bauteile in Expositionsklasse XC3 oder Außenbauteile in Expositionsklassen <b>XC4/XF1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Robuste Frischbetoneigenschaften</li> <li>▪ Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)</li> <li>▪ Druckfestigkeit = Dauerhaftigkeit?</li> </ul>

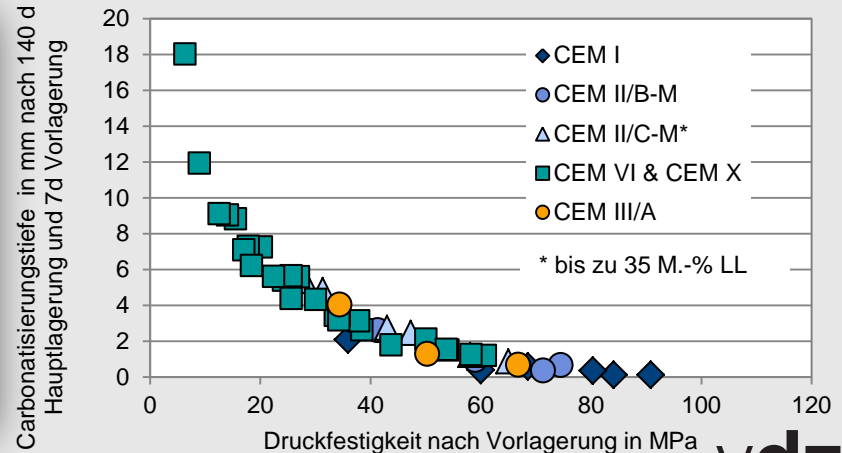


Expositions-klasse	Carbonatisierungsfortschritt / Korrosionsrisiko/Wassersättigung
<b>XC1 (trocken)</b>	Hohe Carbonatisierungsrate / <b>kein Korrosionsrisiko</b> aufgrund fehlender Feuchte
<b>XC3</b>	Mittlere Carbonatisierungsrate / relativ <b>geringes Korrosionsrisiko</b>
<b>XC4/XF1</b>	<b>Geringe Carbonatisierungsrate</b> / relativ hohes Korrosionsrisiko <b>mäßige Wassersättigung</b>



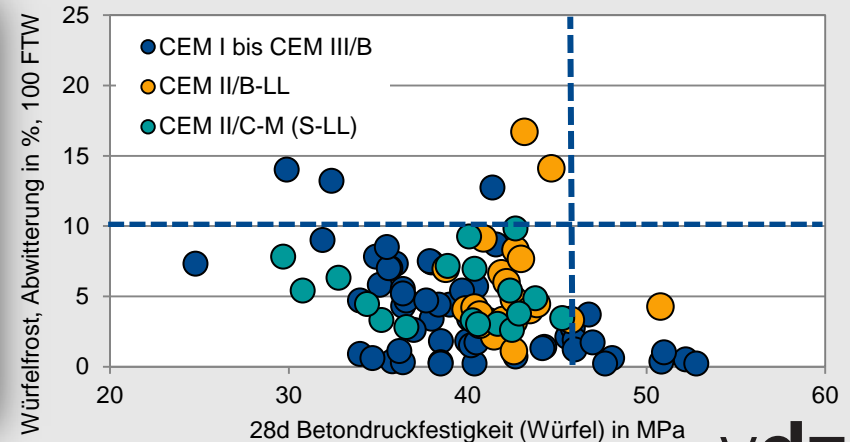
# Welche Eigenschaften sind relevant?

Anwendung/Baufaufgabe	Relevante Eigenschaften
Innenbauteile in Expositionsklasse <b>XC1 (trocken)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Robuste Frischbetoneigenschaften</li> <li>Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)</li> </ul>
Bauteile in Expositionsklasse XC3 oder Außenbauteile in Expositionsklassen <b>XC4/XF1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Robuste Frischbetoneigenschaften</li> <li>Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)</li> <li>Druckfestigkeit = Dauerhaftigkeit?</li> </ul>



# Welche Eigenschaften sind relevant?

Anwendung/Baufaufgabe	Relevante Eigenschaften
Innenbauteile in Expositionsklasse <b>XC1 (trocken)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Robuste Frischbetoneigenschaften</li><li>▪ Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)</li></ul>
Bauteile in Expositionsklasse XC3 oder Außenbauteile in Expositionsklassen <b>XC4/XF1</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Robuste Frischbetoneigenschaften</li><li>▪ Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)</li><li>▪ Druckfestigkeit = Dauerhaftigkeit?</li></ul>



# Welche Mengen werden benötigt?

Zementinlandversand 2018:		29 Mio. t
Einsatz im Transportbeton/Ortbeton	56,5 %	16,4 Mio. t
Innen-/Außenbauteile (XC1 bzw. XF1/XC4)	rd. 64 %	10,5 Mio. t
Ziel: Klinker/Zement-Faktor	0,50	5,25 Mio. t
Hüttensand:		
bbs-Prognose für 2035 (untere Variante)		6,7 Mio. t
CEM III	rd.	3,5 Mio. t
Hüttensandgehalt im Zement z. B.	rd. 30 %	3,2 Mio. t
Mittlere Zusammensetzung	50 % K, 30 % S, 20 %LL	

# Klinkereffiziente Zemente – Weiterentwicklung der EN 197 - 1

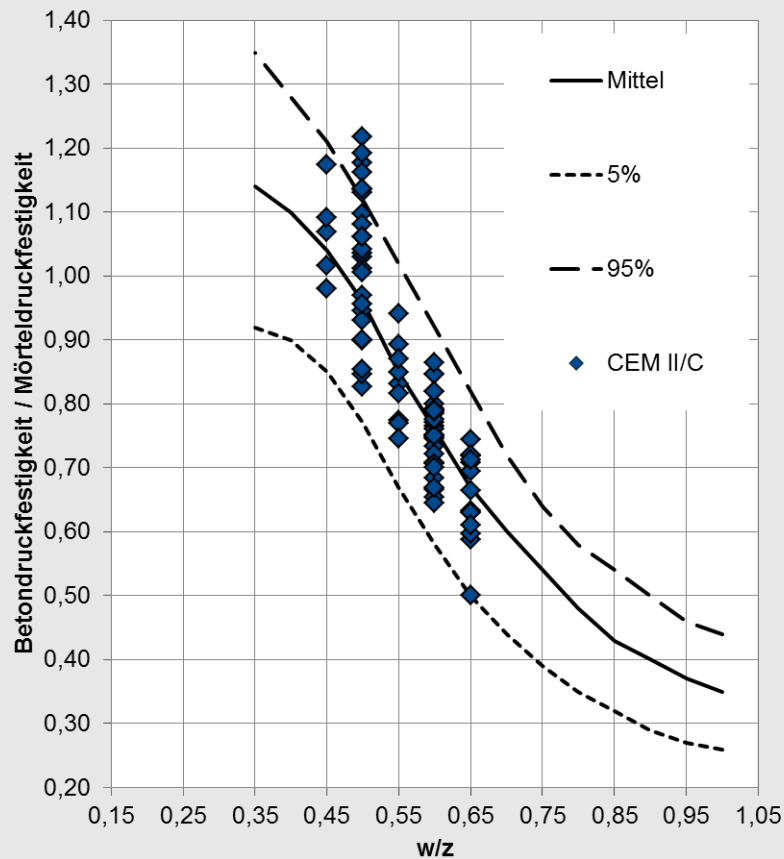
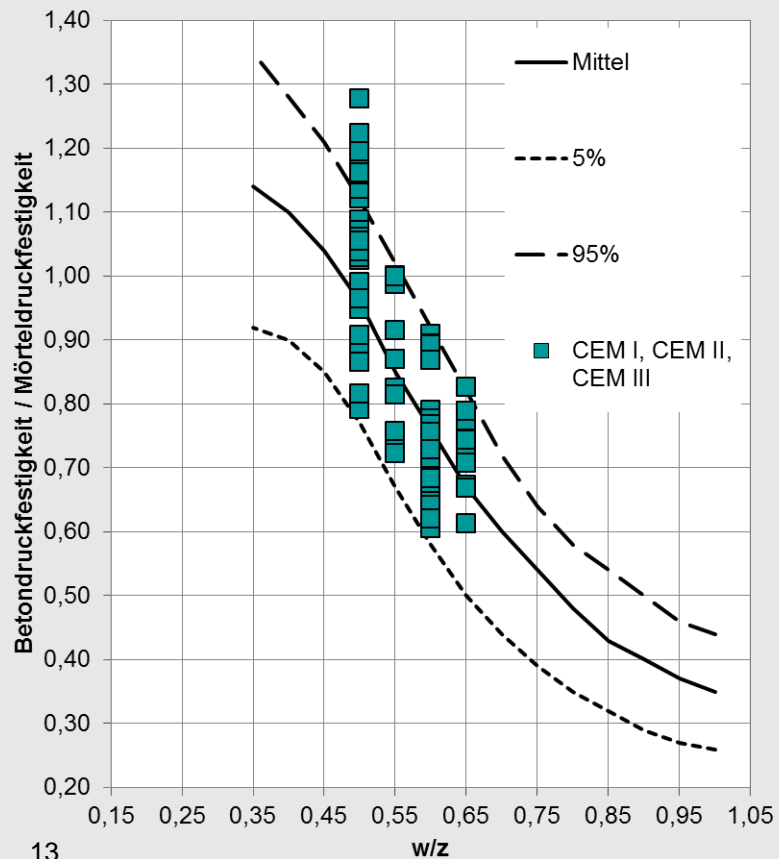
Main types	Notation of the 39 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass <sup>a</sup> )										Minor additional constituents	
			Main constituents									Limestone		LL
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	T			
						natural	natural calcined	siliceous	calcareous					
Type name	Type notation	K	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL			
CEM II	Portland-composite cement <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-88	<----- 12-20 ----->								0-5		
		CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->								0-5		
		CEM II/C-M (S-P)	50-64	16-44	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5	
		CEM II/C-M (S-V)	50-64	16-44	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5	
		CEM II/C-M (S-L)	50-64	16-44	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5	
		CEM II/C-M (S-LL)	50-64	16-44	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5	
		CEM II/C-M (P-L)	50-64	–	–	16-44	–	–	–	–	6-20	–	0-5	
		CEM II/C-M (P-LL)	50-64	–	–	16-44	–	–	–	–	–	6-20	0-5	
		CEM II/C-M (V-L)	50-64	–	–	–	–	–	16-44	–	–	6-20	–	0-5
		CEM II/C-M (V-LL)	50-64	–	–	–	–	–	16-44	–	–	–	6-20	0-5
CEM VI	Composite cement <sup>c</sup>	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5	
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5	
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5	
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5	

<sup>a</sup> The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.

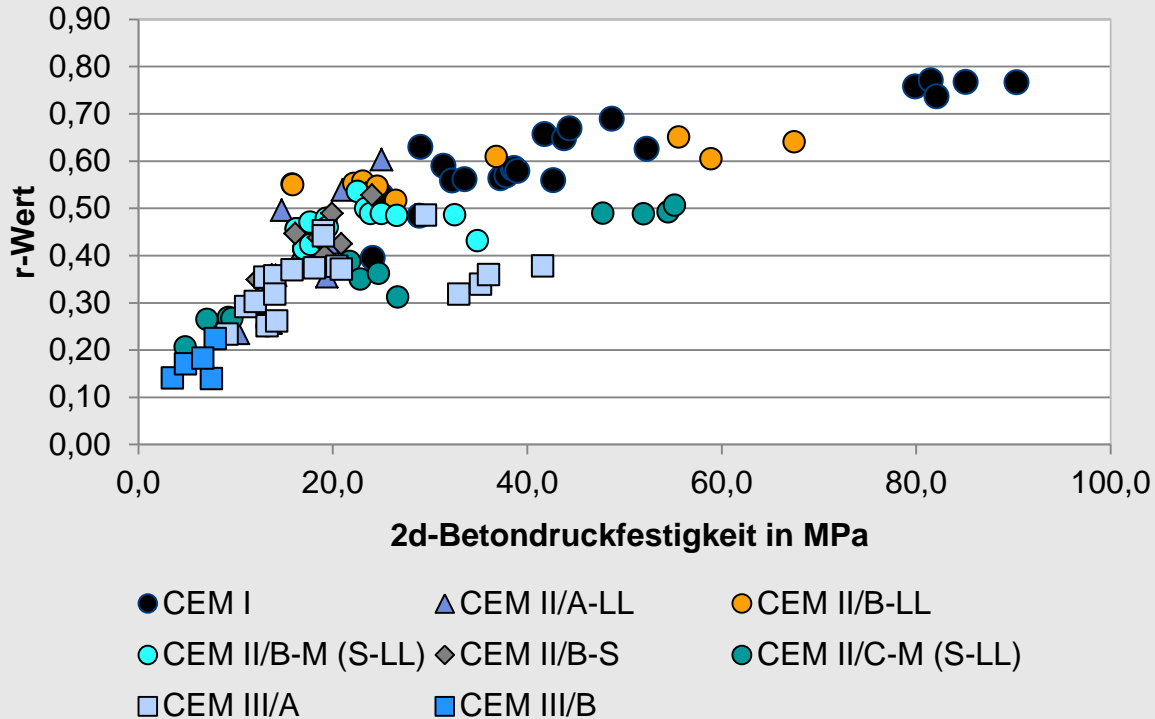
<sup>b</sup> The proportion of silica fume is limited to 6-10 % by mass.

<sup>c</sup> In Portland-composite cements CEM II/A-M, CEM II/B-M and CEM II/C-M, in Pozzolanic cements CEM IV/A and CEM IV/B, in Slag-pozzolanic cements CEM V/A and CEM V/B and in Composite cements CEM VI the main constituents other than clinker shall be declared by designation of the cement (for examples, see Clause 7).

# „Walz-Kurve“



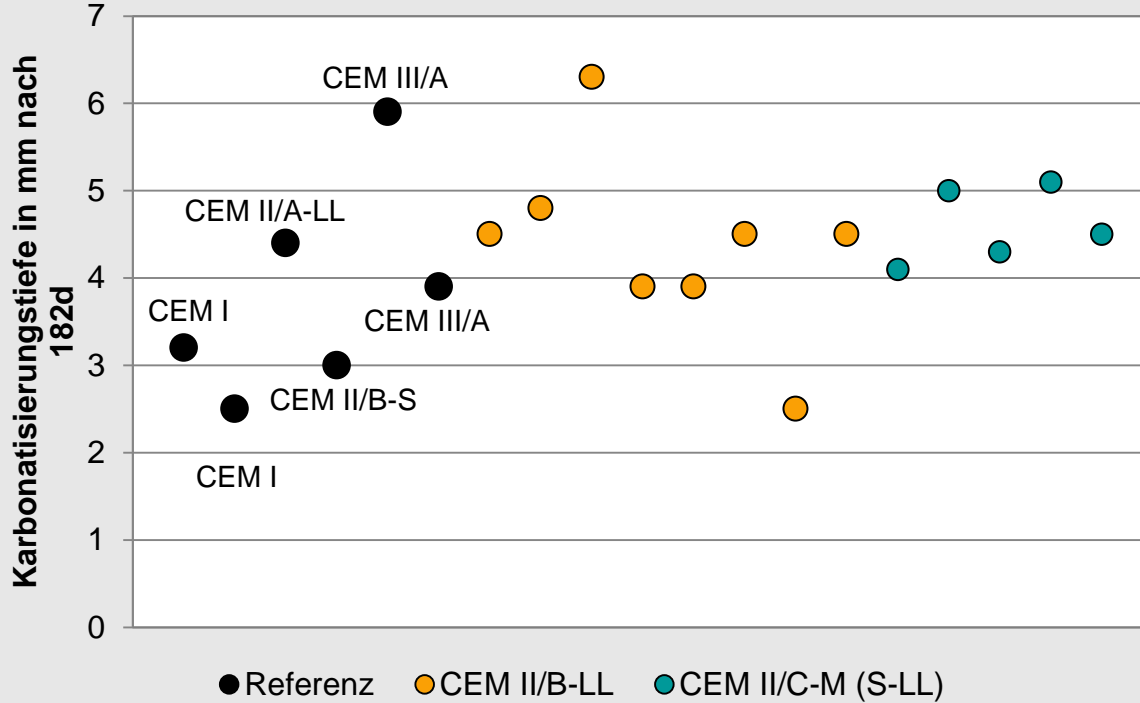
# Relative Betondruckfestigkeit („r-Wert“)



Oberflächen- temp. (Frischbeton -temp.) in °C	$r = f_{cm2}/f_{cm28}$		
	≥ 0,15	≥ 0,30	≥ 0,50
	Minstdauer der Nachbehandlung in d nach DIN 1045-3 *)		
ϑ ≥ 25	2 (4)	2 (2)	1 (1)
25 > ϑ ≥ 15	4 (4)	2 (2)	1 (1)
15 > ϑ ≥ 10	7 (7)	4 (4)	2 (2)
10 > ϑ ≥ 5	10 (14)	6 (8)	3 (4)

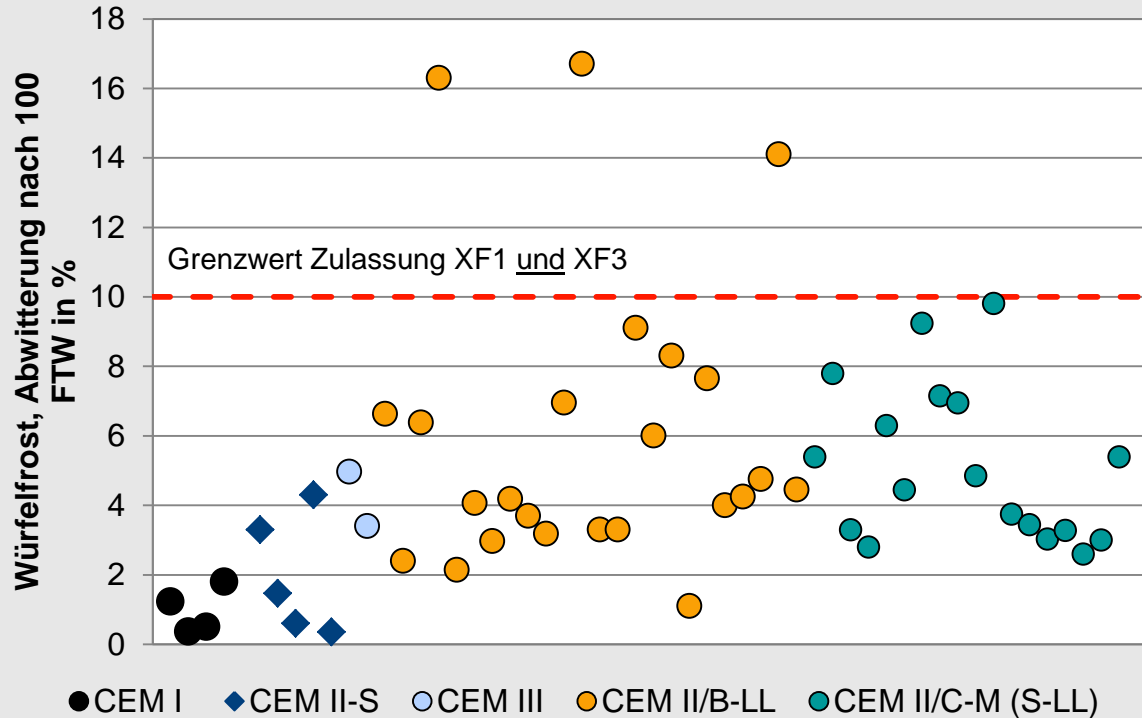
\*) Werte für Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM; (...) Werte für XC2, XC3, XC4 und XF1

# Carbonatisierungswiderstand



- Daten: verschiedene Quellen
- Carbonatisierungsprüfung: DAFStb, Heft 422
- 7d Vorlagerung  
Hauptlagerung 20 °C/65 % r. H.  
0.04 % CO<sub>2</sub> Konzentration
- Betonzusammensetzung:  
 $z = 260 \text{ kg/m}^3$   
 $w/z = 0,65$

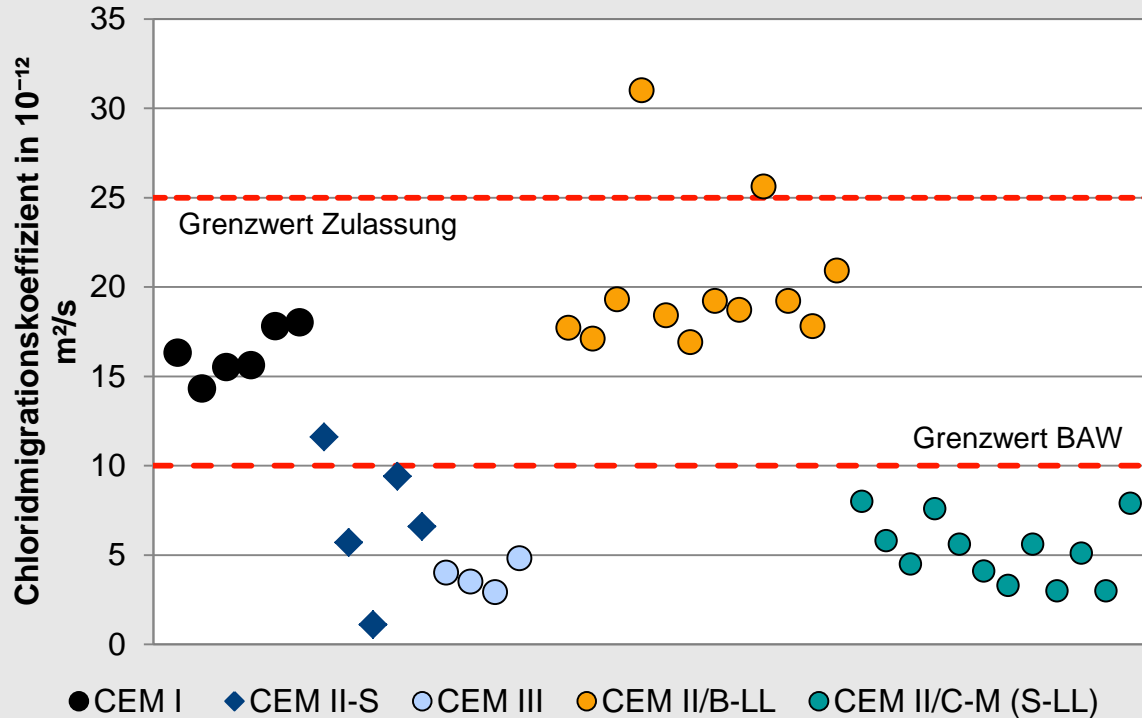
# Frostwiderstand



- Daten: verschiedene Quellen
- EAD 15001-00-0301 No 17, Method 1: **Würfel-Verfahren** nach CEN/TS 12390-9
- Betonzusammensetzung:  
 $z = 300 \text{ kg/m}^3$   
 $w/z = 0,60$

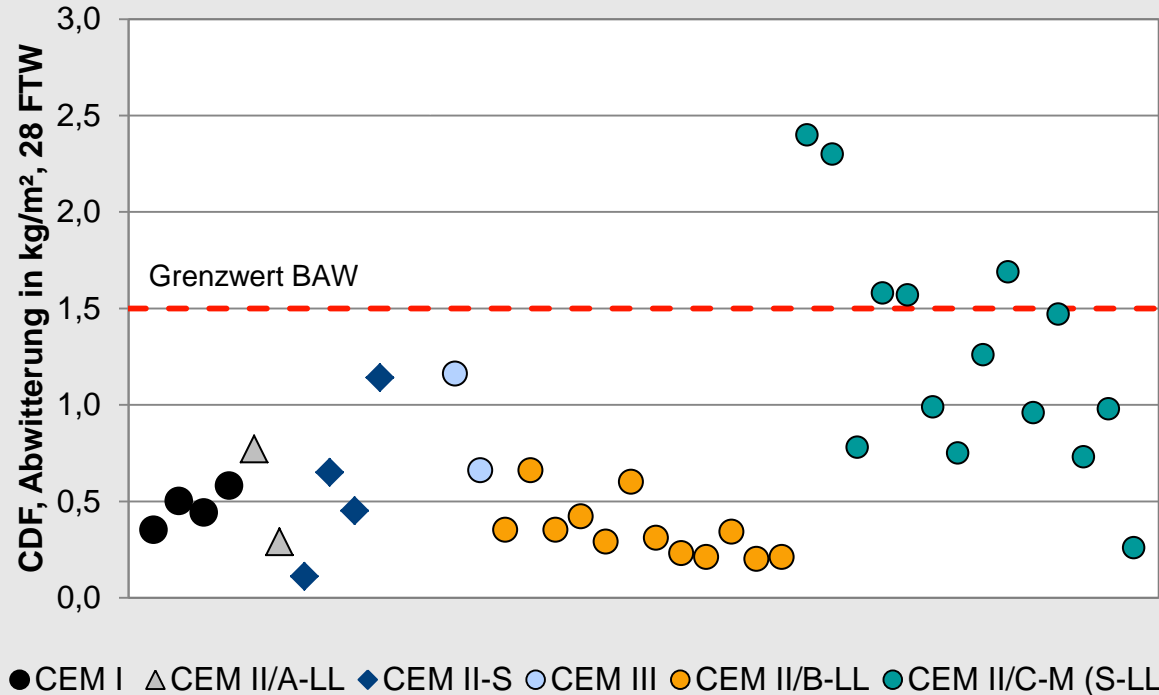


# Chlorideindringwiderstand



- Daten: verschiedene Quellen
- EAD 15001-00-0301 No 16, Method 1: **Chlorid-Migration** nach Annex E von EAD 15001-00-0301
- Betonzusammensetzung:  
 $z = 320 \text{ kg/m}^3$   
 $w/z = 0,50$

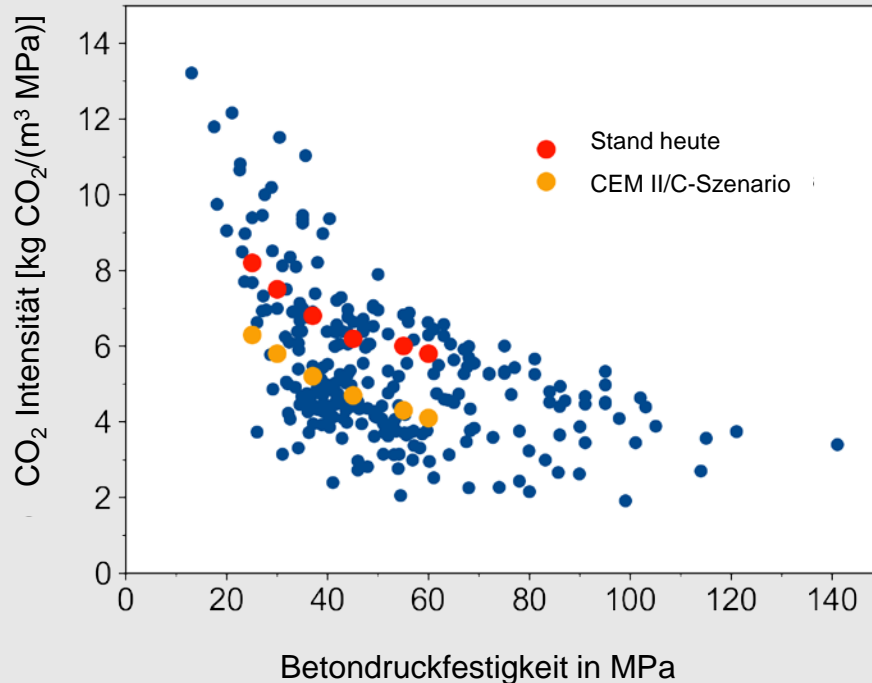
# Frost-Tausalz-Widerstand



- Daten: verschiedene Quellen
- Frost-Tausalz-Widerstand nach EAD 15001-00-0301 No 18, Method 1: CDF test acc. to CEN/TS 12390-9
- Betonzusammensetzung:  
 $z = 320 \text{ kg/m}^3$   
 $w/z = 0,50$   
LP-Beton

# CO<sub>2</sub>-Intensität: Ausgangssituation und CEM II/C-Szenario

## CO<sub>2</sub>-Intensität der Betone in DE



- CEM II/C und ggf. CEM II/B-LL:
  - mindestens einsetzbar in Innen- und Außenbauteilen des üblichen Hochbaus (rd. 65% des Ortbetons in Deutschland)
- Potential zur Verringerung der CO<sub>2</sub> Intensität rd. 25%

# Schlussfolgerungen

- Ressourceneffizienz und Klimaschutz werden die Betonbauweise weiter vor Herausforderungen stellen
- Portlandzementklinker bleibt auf absehbare Zeit der wesentliche Bestandteil von Zement
- Klinkereffiziente Zemente tragen dazu bei, die CO<sub>2</sub>-Intensität des Betons weiter zu senken: zukünftig zusätzlich CEM II/C und CEM VI
- Rohstoffe (mehr als bisher) nach ihrer Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit beurteilen und einsetzen, z. B:
  - Betone für weite Teile des üblichen Hochbaus
  - Betone unter besonderer Beanspruchung

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt:

Dr.-Ing. Christoph Müller

[christoph.mueller@vdz-online.de](mailto:christoph.mueller@vdz-online.de);

[www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)

Tel.: +49 (0)211 45 78-372

Fax: +49 (0)211 45 78-219

VDZ gGmbH

**Forschung Technologie**

Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf