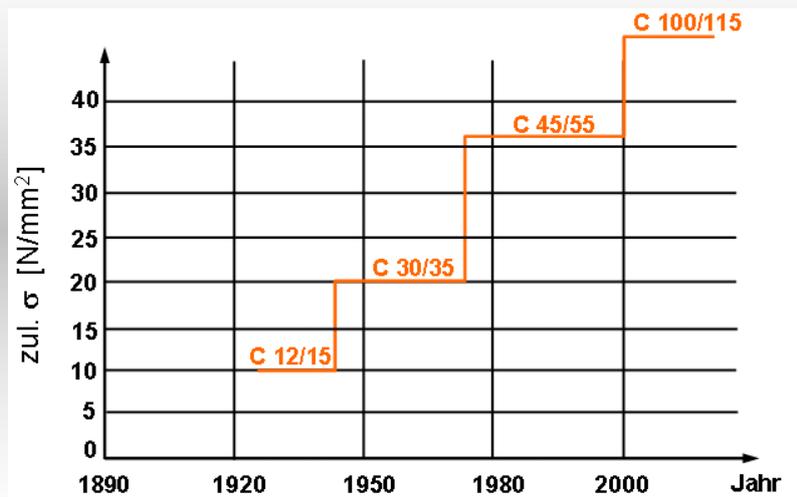


# Hochfester Beton

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

## Festigkeitsentwicklung



## Definition Hochfester Beton hohe Tragfähigkeit

- > C50/60 Normalbeton, Schwerbeton
- > LC50/55, Leichtbeton
- C90/105 und C100/115 sowie für hochfesten LC70/77 und LC80/88
  - Zustimmung im Einzelfall oder
  - allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

Genormt: DIN 1045-2, DIN EN 206-1 ⇨ DIN FB 100

## Definition Hochleistungsbeton hohe Dauerhaftigkeit

- Dichtigkeit (Gas, Wasser)
- Widerstand gegen physikalische und chemische Einwirkungen
- Widerstand gegen mechanische Einwirkungen
- ...

# Festigkeitsklassen

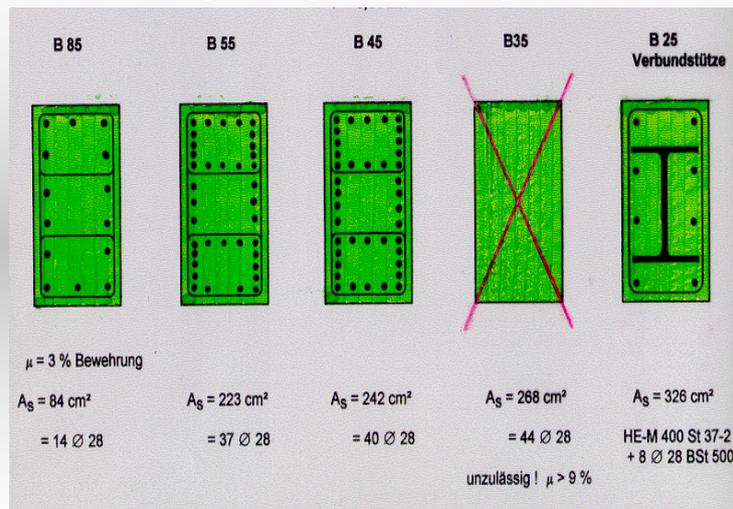
Normal- und Schwerbeton		
Druckfestigkeitsklasse	$f_{ck, cyl.}^{1)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{ck, cube}^{1), 2)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20		
C20/25		
C25/30		
C30/37		
C35/45		
C40/50		
C45/55		
C50/60		

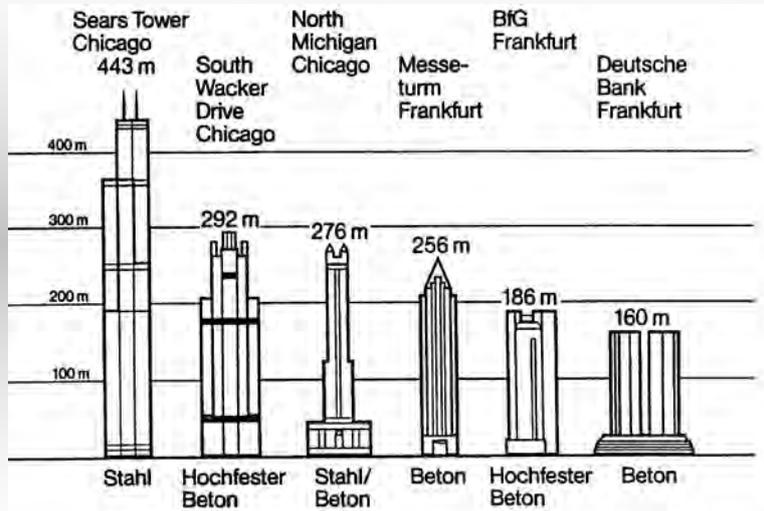
Hochfester Normal- und Schwerbeton		
Druckfestigkeitsklasse	$f_{ck, cyl.}^{1)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{ck, cube}^{1), 2)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

<sup>1)</sup> Lagerung 28 Tage unter Wasser  
<sup>2)</sup> Bei Lagerung nach DIN EN 12390-2, Anhang NA siehe Kap. 6.5.1.2

# Tragfähigkeitsvergleich

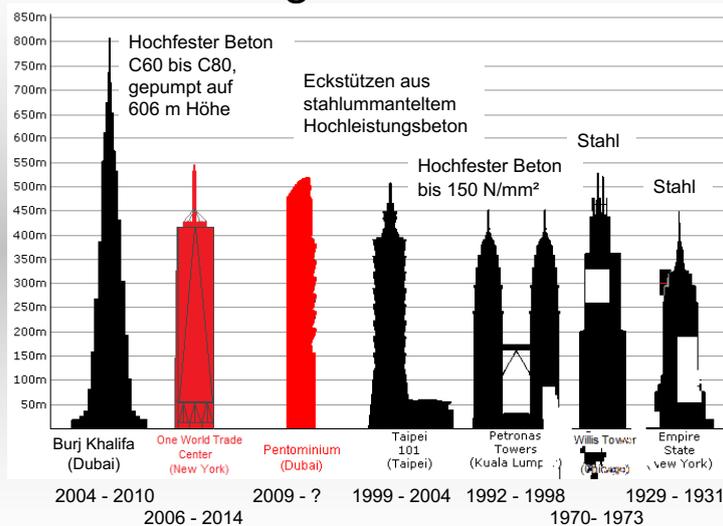


## Entwicklung im Hochhausbau



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Entwicklung im Hochhausbau

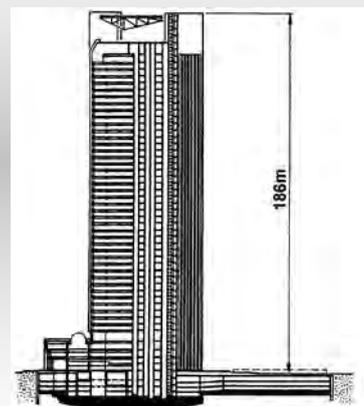


der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Erste Anwendungen in Deutschland

- Hochhaus Trianon – Erstanwendung in Deutschland (B85)
- SI Hotel Stuttgart (B85)
- Hochhaus Taunustor Japan Center (B105)
- Commerzbank Zentrale (B65)
- Betriebsbrücke Weißeritz (B85)

## Hochhaus Mainzer Landstraße Frankfurt



## Petronas Twin Towers, Kuala Lumpur

- $f_c = 80 \text{ N/mm}^2$



Bildquelle: <http://de.wikipedia.org>



## Two Union Square Seattle

- $f_c = 130 \text{ N/mm}^2$

Bildquelle:  
<http://picasaweb.google.com/lh/photo/pHApL2hc3BRNcXZ2ic1BeA>

## Burj Kalifa

- Höhe: 828 m
- Festigkeitsklassen:
  - C60 und C80 für die Wände des zentralen Kerns und
  - C50 für die Geschossdecken
- Maximale Pumphöhe: 606 m



Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Burj\\_Khalifa](http://de.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa)

## Zusammensetzung

- Die hohe Festigkeit von hochfestem Beton wird erreicht durch:
  - Niedrige Wasser-Zement (Bindemittel)-Werte
  - Häufig Einsatz puzzolaner Stoffe (FA, MS)
  - Verwendung von leistungsfähigen Fließmitteln
  - Normzemente mit hoher Festigkeit (CEM 42,5 oder CEM 52,5)
  - Geeignete Gesteinskörnung

## Gesteinskörnung für hochfesten Beton

- Gesteine hoher Festigkeit,
- gebrochene, gedrungene Form
- Sieblinie zwischen A und B
- Größtkorn reduzieren  $\Rightarrow$  Gefügespannungen minimieren (max. 16 bis 22 mm)
- keine Alkali-empfindliche Gesteinskörnung verwenden

## Gesteinskörnung für hochfesten Beton

Kornform	natürlich		gebrochen	
	kugelig	nicht kugelig (stengelig/plattig)	kubisch	nicht kubisch (stengelig/plattig)
				
Kantigkeit	rund		kantig	
Oberflächen- rauigkeit	glatt		rau	
Kornoberfläche				
Wasserbedarf				
Verarbeitbarkeit				
Verdichtbarkeit				

## Zement für hochfesten Beton

- Hohe Nennfestigkeit
- für hohe Frühfestigkeit  $\Rightarrow$  hohe Mahlfeinheit
- grober Zement  $\Rightarrow$  Nacherhärtungspotenzial
- evtl. niedrige Wärmeentwicklung
- Verträglichkeit mit Zusatzmitteln prüfen

## w/z-Wert für hochfesten Beton

- **niedrige Wasserzementwerte**

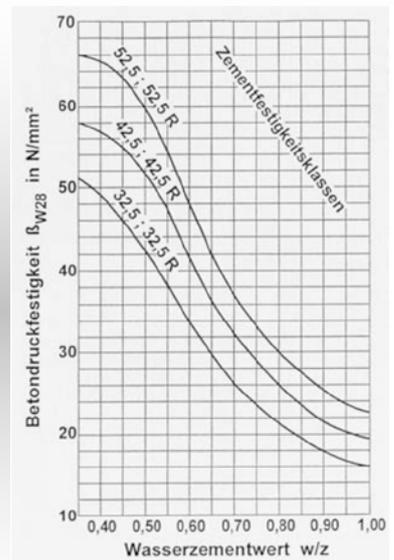
$\Rightarrow$  somit geringes Kapillarvolumen

Damit der Wasseranspruch und damit auch der Zementgehalt (vorgegebener w/z-Wert) möglichst gering ausfällt

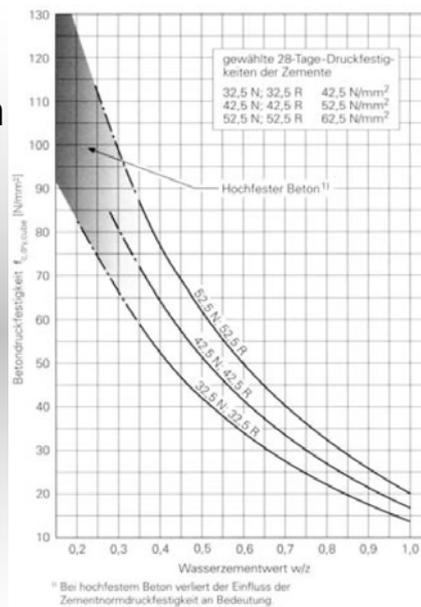
$\Rightarrow$

- geeignete Kornzusammensetzung
- hoher Zement- bzw. Zusatz-Anteil  
 $\rightarrow$  kleiner Anteil an Feinkorn
- Begrenzung des Größtkorns (wegen Verarbeitbarkeit)

## Walz-Diagramm Normalbeton



## Walz-Diagramm Hochfester Beton



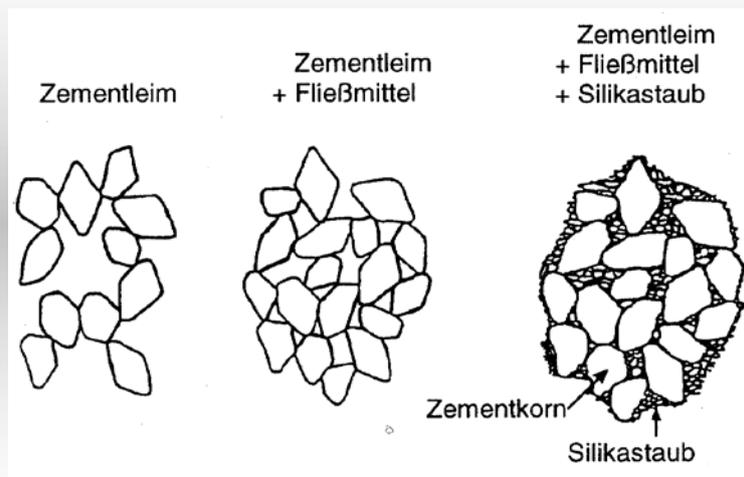
**Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit, Normfestigkeit des Zements und Wasserzementwert**  
(in Anlehnung an Zement-Taschenbuch 2000, S. 274)

<sup>11</sup> Bei hochfestem Beton verliert der Einfluss der Zementnormdruckfestigkeit an Bedeutung.

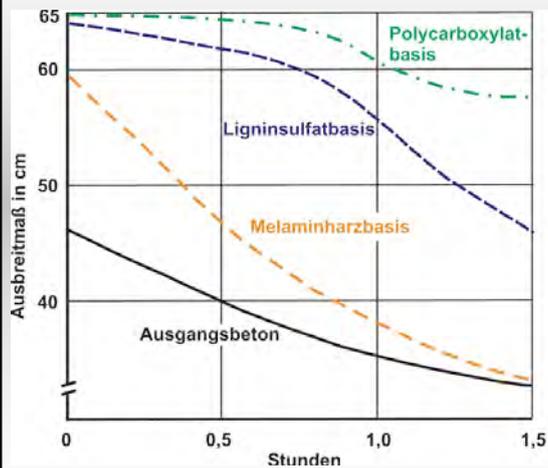
## Fließmittel für hochfesten Beton

- Hochfester Beton wurde möglich mit Entwicklung neuer Fließmittel (PCE)
- Zum Teil kommen Kombinationspräparate zum Einsatz, weil Zement und Zusatzstoffe unterschiedliche Anforderungen stellen
- Niedrige Wassergehalte wurden gezielt realisierbar

## Fließmittel für hochfesten Beton



## Fließmittel für hochfesten Beton



Beton mit  $320 \text{ kg/m}^3$  CEM I  
 $\omega = 0,56$   
 $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

**Konsequenz**  
Zugabe der Fließmittel  
auf der Baustelle bei  
längerer Einbaudauer

der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Betonzusatzstoffe für hochfesten Beton

- Flugasche
- Silicastaub
- Metakaolin
- Stahl-/Kunststofffasern
- ...

der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## HFB herstellen, einbauen, nachbehandeln

- Dosieren und Mischen
  - noch präzises Einhalten der Zusammensetzung
  - Mischreihenfolge beachten
    - Gesteinskörnung (und Silicasuspension), Zement; Wasser und Silicasuspension; Fließmittel
    - Intensives Mischen nötig: > 3 min

## Hochfester Beton Mischregime

Reihenfolge	Beschreibung	Mischzeit [s]
1	Gesteinskörnung + Silicaslurry	30
2	Zement + Flugasche	30
3	Zugabewasser	60
4	Fließmittel	60

## HFB herstellen, einbauen, nachbehandeln

### • **Verarbeitbarkeit**

Anforderung an Verarbeitbarkeit wie bei Normalbeton.  
Für Hochleistungbetone ist ein Konsistenzbereich F3 bis F6 anzustreben.

Als Transportbeton ist der Erstarrungsbeginn auf die erforderliche Transport- und Verarbeitungszeit abzustimmen.

Wegen der Verwendung von Fließmitteln ist häufig ein frühes Aussteifen des Frischbetons zu verzeichnen.



- ggf. Nachdosieren des Fließmittels unmittelbar vor dem Einbau

## HFB herstellen, einbauen, nachbehandeln

Hochleistungsbeton ist in der Regel gut mit Betonpumpen förderbar.  
Er kann meist unproblematisch mit Flaschenrüttlern verdichtet werden.  
Da Hochleistungsbeton im Vergleich zu Normalbeton eine klebrigere Konsistenz besitzt, ist mit größerem Verdichtungsaufwand zu rechnen.

- beim Einbau mit Pumpen sind auch größere Fallhöhen möglich, da
- hochfeste Betone kaum „bluten“ (geringer Wassergehalt)
- dies erhöht die Gefahr d. plastischen Schwindens



### **Schutzmaßnahmen**

Bei Transport und Verarbeitung ist besonders zu beachten, dass möglichst wenig Wasser verdunsten kann.

## HFB herstellen, einbauen, nachbehandeln

- **Nachbehandlung**

Anforderungen an die Nachbehandlung von Normalbeton gelten auch für hochfesten Beton. Allerdings ist hochfester Beton weitaus empfindlicher gegen Austrocknung. Die Qualität des Betons wird maßgeblich von der Nachbehandlung bestimmt.

- **bevorzugt wasserzuführende Maßnahmen**, da das Anmachwasser schnell verbraucht ist.

Allerdings ist zu beachten, dass hochfeste Betone schon nach wenigen Tagen eine hohe Dichtheit aufweisen, so dass von außen zugeführtes Wasser nicht mehr eindringen kann.

## Innere Nachbehandlung

- Einsatz künstlicher Wasserreservoirs
  - Vorgenässte leichte Gesteinskörnung
  - SAP (super absorbierende Polymere)

## Zusätzliche Kontrolle der Betonausgangsstoffe bei hochfestem Beton

	Beton- ausgangsstoff	Überprüfung/ Prüfung	Zweck	Mindesthäufigkeit
1	Zement	Wassergehalt zur Erzielung der Normsteife nach DIN EN 196-3 Mahlfineinheit nach DIN EN 196-6 Sulfatgehalt nach DIN EN 196-2	Einhalten der vereinbarten Anforderungen	jede Lieferung vor Betonherstellung
		Rückstellproben	Aufbewahren bis zum erfolgten Festigkeitsnachweis oder vereinbarten Zeitpunkt	
8	Zusatzmittel	Dichte	Einhalten der festgelegten Anforderungen	jede Lieferung vor Betonherstellung
		Rückstellproben	Aufbewahren bis zum erfolgten Festigkeitsnachweis oder vereinbarten Zeitpunkt	
10	Zusatzstoffe	Flugasche: — Wasser zur Erzielung der Normsteife in Anlehnung an DIN EN 196-3 oder gleichwertige Verfahren	Einhalten der vereinbarten Anforderungen	jede Lieferung vor Betonherstellung
13		Silikasuspension: — Dichte — Wassergehalt		
13a		Rückstellproben		
17	Gesteinskörnung	Siebversuch an jeder Korngruppe	Einhalten der vereinbarten Anforderungen	einmal täglich vor Betonherstellung

der Bundeswehr  
**Universität München**  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Zusätzliche Kontrolle der Ausstattung bei hochfestem Beton

	Ausstattung	Überprüfung/ Prüfung	Zweck	Mindesthäufigkeit
3a	Wägeeinrichtungen für Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoffe	Prüfung der Wägegenauigkeit	Sicherstellen der Genauigkeit nach 9.6.2.2	je Betoniertag vor der Herstellung
5	Zugabegeräte für Betonzusatzmittel	Prüfung der Genauigkeit	Erzielen genauer Zugaben	je Betoniertag vor der Herstellung
6a	Wassermesser	Vergleich zwischen Messwert und Zielwert	einwandfreies Arbeiten	je Betoniertag vor der Herstellung
10	Mess- und Laborgeräte	Funktionskontrolle	einwandfreies Arbeiten	je Betoniertag vor der Herstellung
11a	Mischwerkzeuge	Funktionskontrolle	einwandfreies Arbeiten	je Betoniertag vor der Herstellung
11b	Fahrmischer	Augenscheinprüfung	kein Spülwasser in der Trommel	vor jeder Beladung

der Bundeswehr  
**Universität München**  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

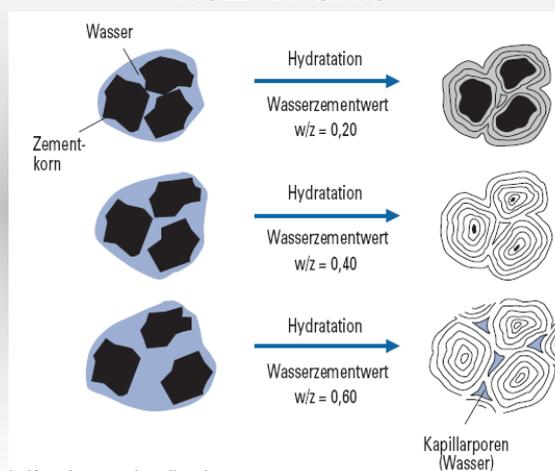
## Zusätzliche Kontrolle der Herstellverfahren und der Betoneigenschaften bei hochfestem Beton

	Prüfgegenstand	Überprüfung/ Prüfung	Zweck	Mindesthäufigkeit
2	Wassergehalt der feinen Gesteinskörnung	Darrversuch	Bestimmen der Trockenmasse und des noch erforderlichen Zugabewassers	laufend, Messung am Betoniertag vor Betonierbeginn
4a	Wassergehalt des Frischbetons	Überprüfung der Menge des Zugabewassers	Einhalten der in der Erstprüfung festgelegten Höchstwerte	bei jeder Herstellung von Probekörpern für die Festigkeitsprüfung, jedoch höchstens dreimal je Betoniertag
7	Konsistenz des Frischbetons	Prüfung nach DIN EN 12350-5	Einhalten der in der Erstprüfung und dem Versuchsversuch festgelegten Konsistenz	unmittelbar vor Verlassen des Werkes und unmittelbar vor und nach Fließmittelzugabe an jedem Mischfahrzeug
18	Mischanweisung <sup>a</sup>	Augenschein	Beachten der Mischanweisung	vor jedem Mischen

<sup>a</sup> Die Reihenfolge der Zugabe der Betonausgangsstoffe und die Mischzeit sind in einer Mischanweisung festzuhalten. Der Zeitpunkt der Fließmitteldosierung (auch Nachdosierung) ist bei der Erstprüfung entsprechend der voraussichtlichen Zugabezeit auf der Baustelle zu wählen.

der Bundeswehr  
**Universität München**  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

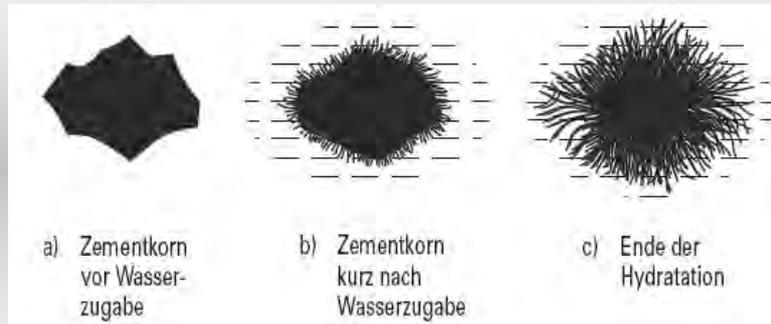
## Zementhydratation bei verschiedenen w/z-Werten



Aus: Zementaschenbuch, Kap. 4, [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)

der Bundeswehr  
**Universität München**  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

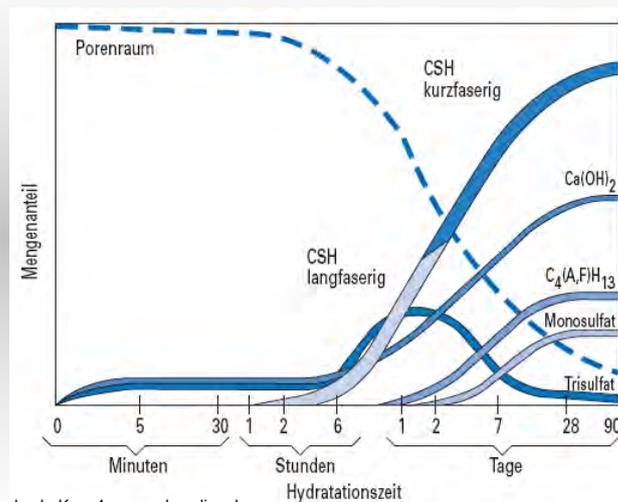
## Hydratation beim normalfesten Beton



Aus: Zementaschenbuch, Kap. 4, [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)

der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

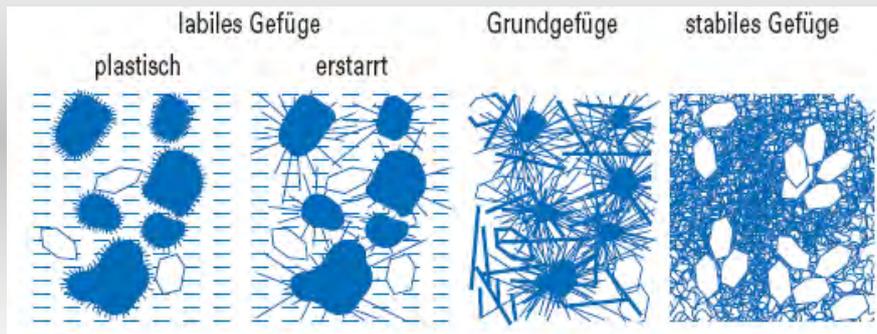
## Hydratation beim normalfesten Beton



Aus: Zementaschenbuch, Kap. 4, [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)

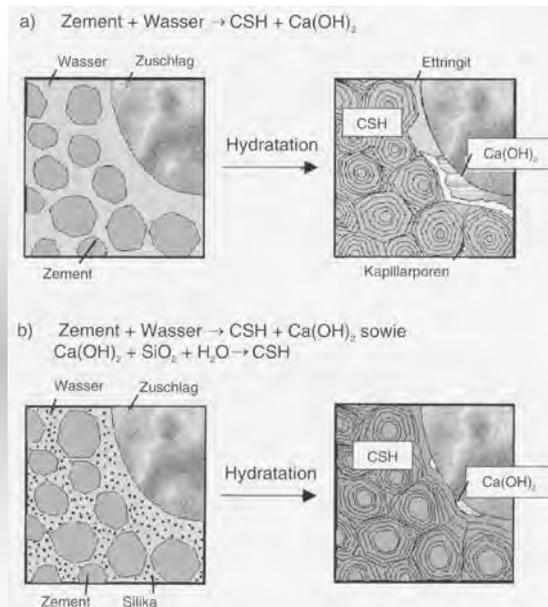
der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

# Hydratation beim normalfesten Beton



Aus: Zementaschenbuch, Kap. 4, www.vdz-online.de

## Zementhydratation Normalbeton – hochfester Beton

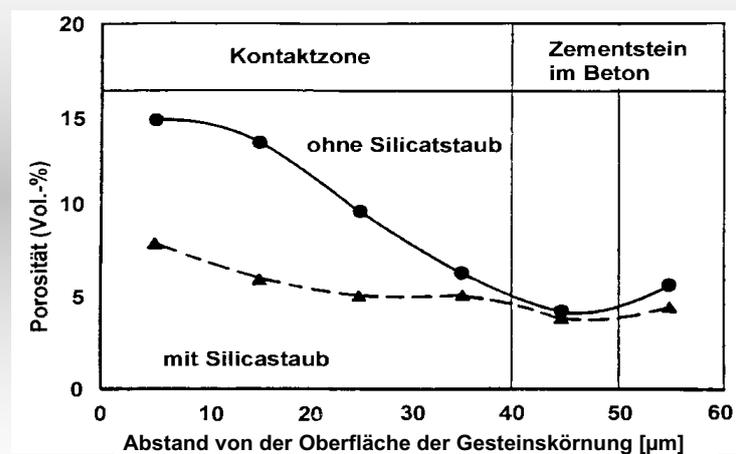




Beim Ersatz von 15 % CEM durch MS kommen ca. 2.000.000 Silicapartikel je Portlandzementkorn

1 µm

## Porosität in der Kontaktzone in Abhängigkeit vom Silicagehalt



Gesteinskorn



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens



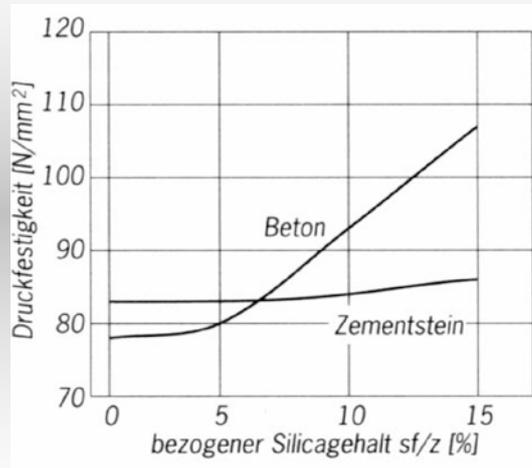
Gesteinskorn



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

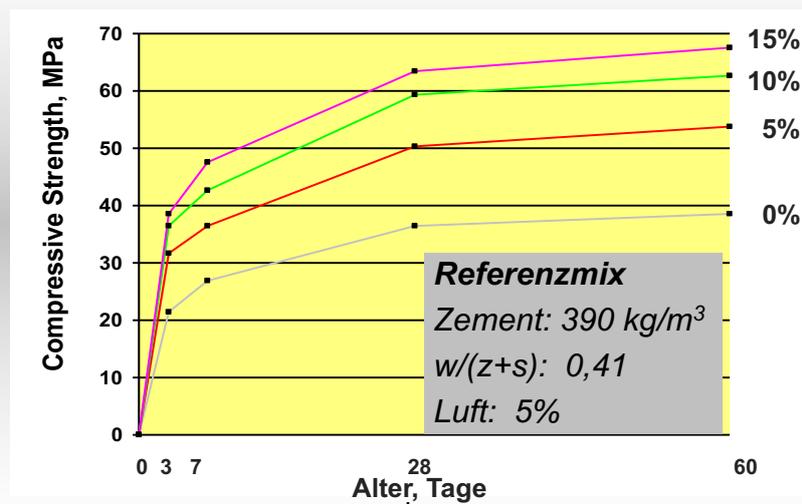


## Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit vom Silicagehalt



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

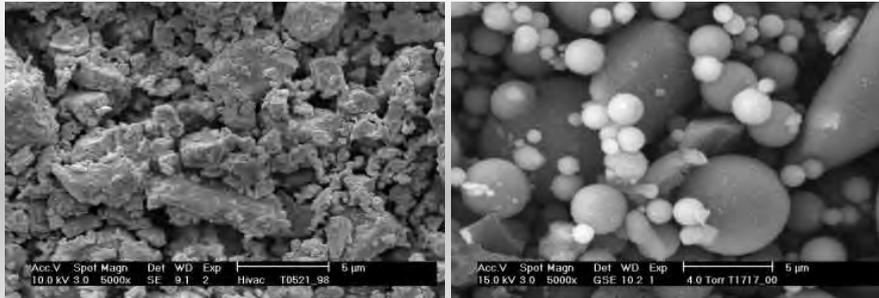
## Erhöhte Betondruckfestigkeit durch Zugabe von Silikastaub



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens



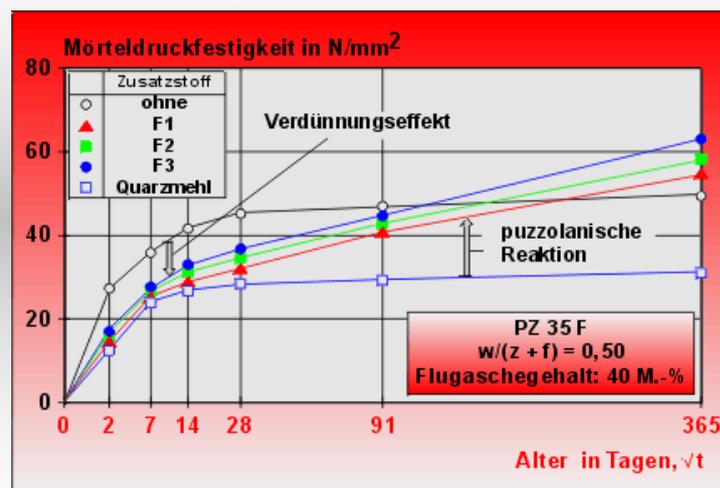
## Kornformen Zementklinker-Flugasche



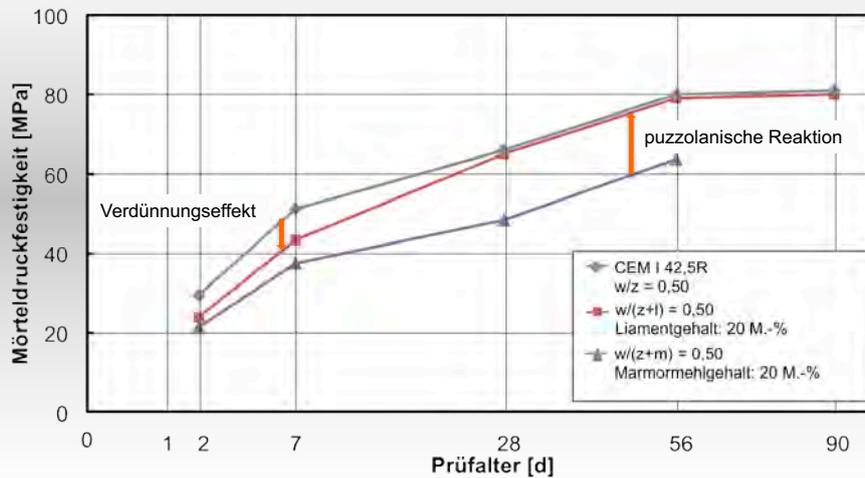
Klinker

Flugasche

## Wirkung von Steinkohlenflugasche Füllerwirkung – puzzolanische Reaktion



## Wirkung von calciniertem Ton Füllerwirkung – puzzolanische Reaktion



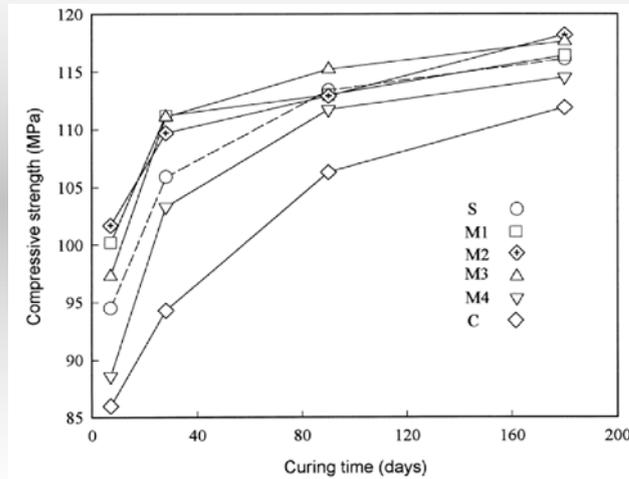
der Bundeswehr  
**Universität München**  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Metakaolin Herstellung

Temperatur [° C]	Vorgang	Chemische Umsetzung
20 – 200	Abgabe von freiem Wasser (Trocknen des Tons)	
200 – 450	Abgabe von adsorbiertem Wasser	
450 – 600	Tonzersetzung, Bildung von Metakaolinit	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2 (Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2) + 4 H_2O$
600 – 950	Metakaolinitzerersetzung, Bildung eines reaktiven Oxidgemisches	$Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2 SiO_2$
950 – 1500	Bildung von Mullit	$3 Al_2O_3 + 2 SiO_2 \rightarrow 3 Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 (3/2\text{-Mullit})$

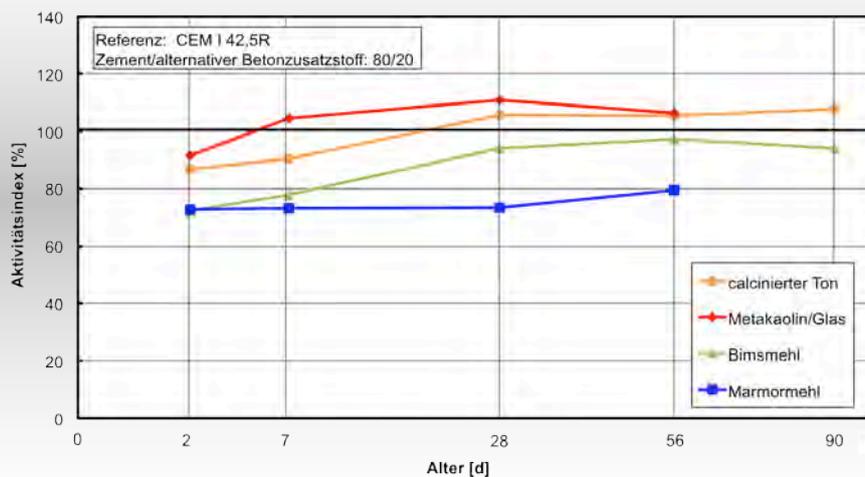
der Bundeswehr  
**Universität München**  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Festigkeitsentwicklung von Mörtel mit unterschiedlichen Bindemittelkombinationen



C: Referenz  
S: Silicastaub  
Mi: Metakaolin

## Festigkeitsentwicklung von Mörtel mit unterschiedlichen Bindemittelkombinationen

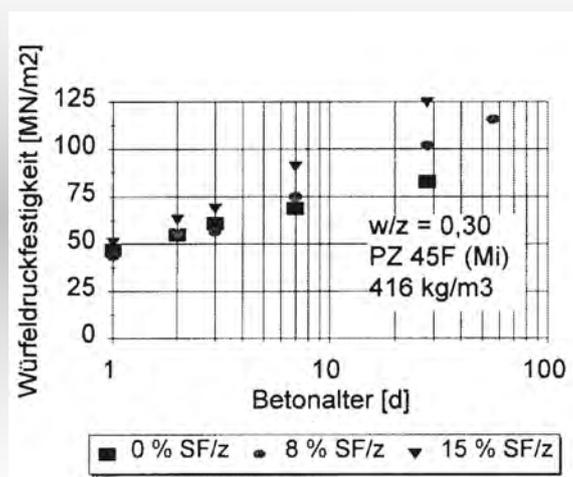


Referenz: CEM I 42,5R  
Zement/alternativer Betonzusatzstoff: 80/20

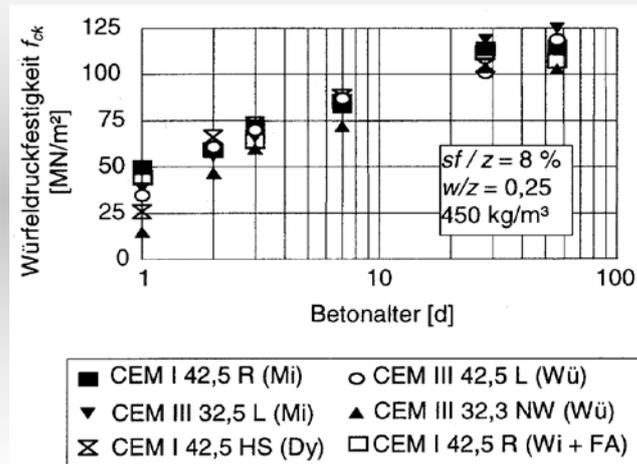
## Metakaolin Eigenschaften

- Sehr hohe Reaktivität
- Beschleunigte Zementreaktion  
⇒ Hohe Hydratationswärme
- Ungefähr so leistungsfähig wie Silicastaub

## Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit vom Silicagehalt

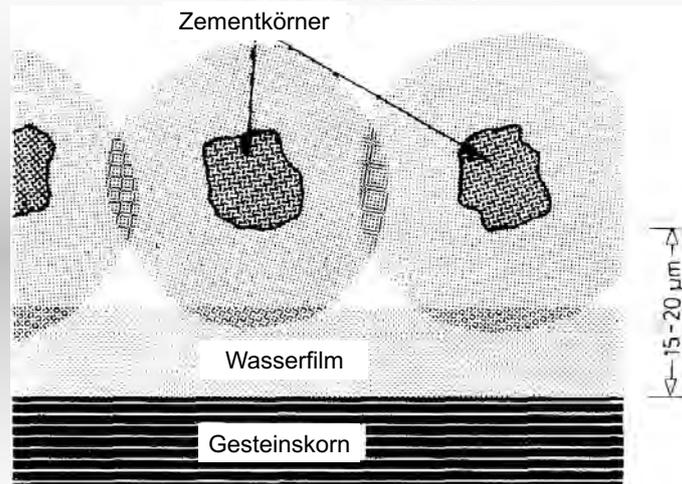


## Festigkeitsentwicklung unterschiedlicher Kompositemente zusammen mit Silicastaub



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

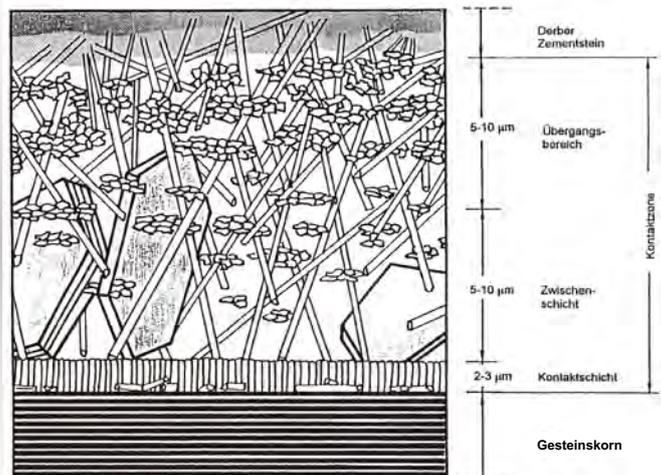
## Kontaktzone



Rehm, G.; Diehm, P.; Zimbelmann, R.: Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton.  
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 283, Ernst und Sohn Berlin, 1977

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

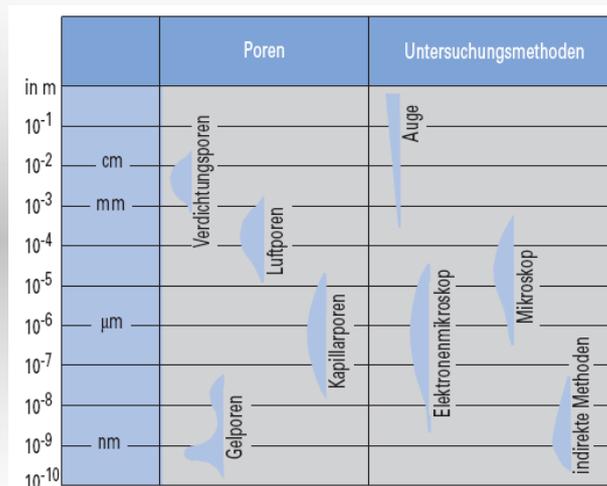
## Kontaktzone



Rehm, G.; Diehm, P.; Zimbelmann, R.: Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 283, Ernst und Sohn Berlin, 1977

der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

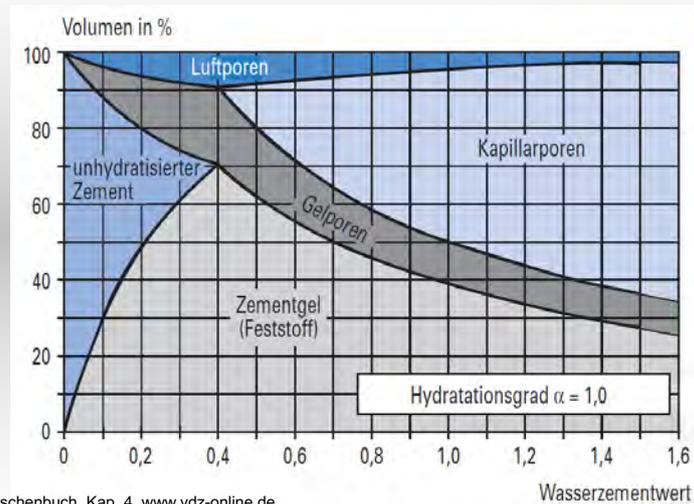
## Poren im Zementstein



Aus: Zementaschenbuch, Kap. 4, [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)

der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Poren im Zementstein



Aus: Zementaschenbuch, Kap. 4, www.vdz-online.de

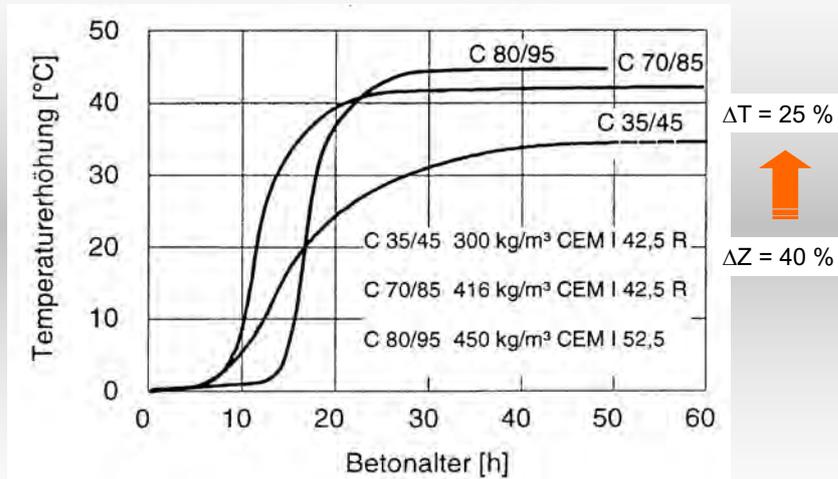
der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Einflüsse auf die Hydratationswärme

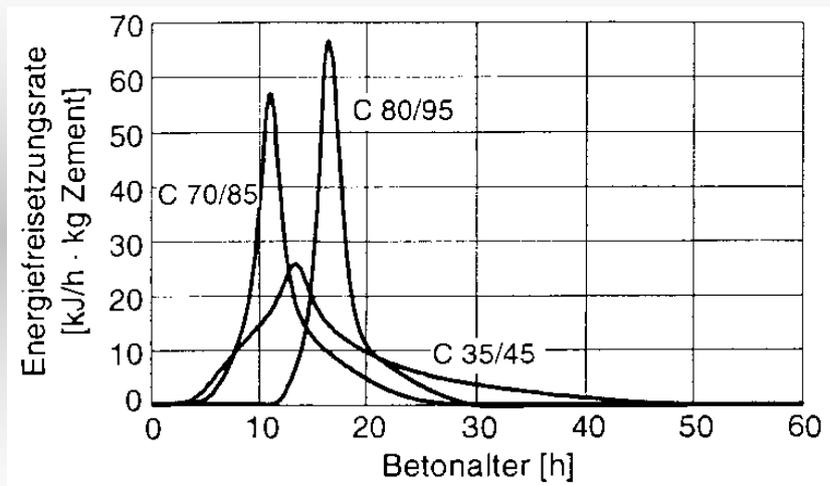
- Zusammensetzung Zementklinker:  $C_3A$ ,  $C_3S$
- Zumahlstoffe: inert – reaktiv
- Mahlfineinheit Klinker
- w/z-Wert
- Zementgehalt
- Klimatische äußere Bedingungen

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

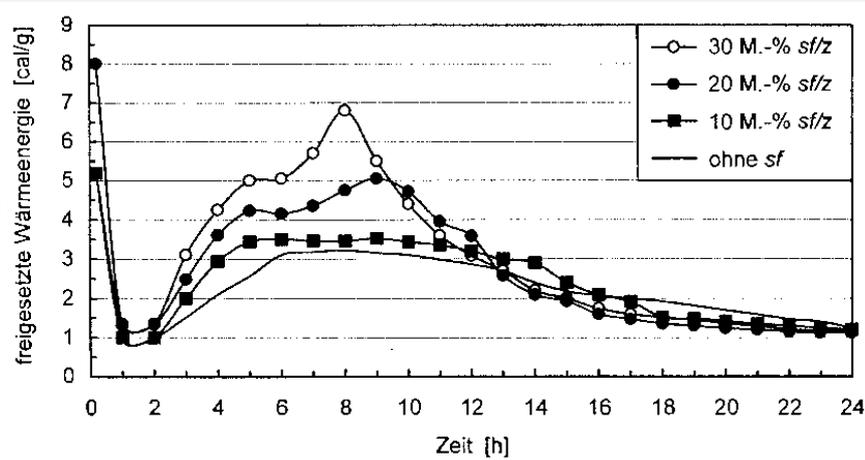
## Hydratationswärmeentwicklung



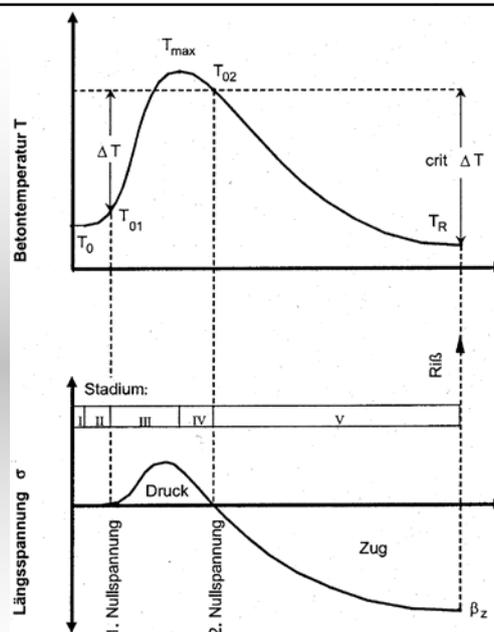
## Hydratationswärmeentwicklung



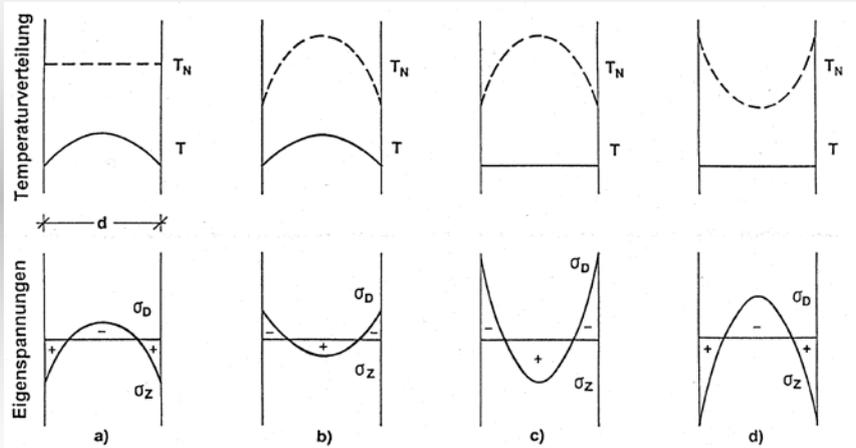
## Hydratationswärmeentwicklung mit unterschiedlichem Silicagehalt



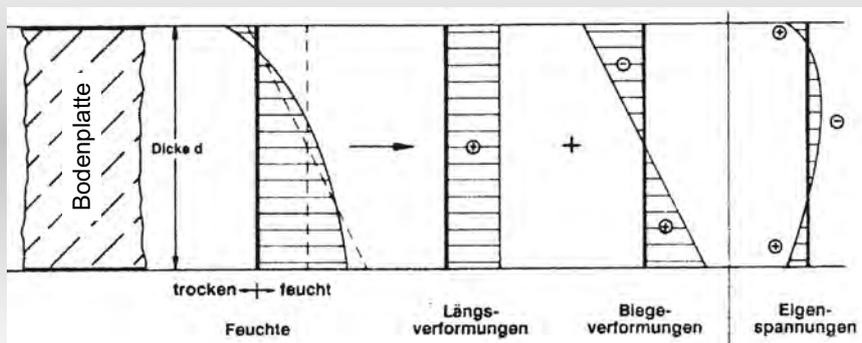
## Stadien der Temperatur- und Spannungsentwicklung im Beton



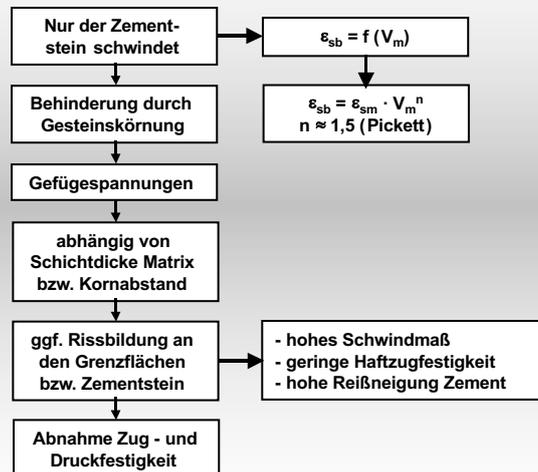
## Spannungen im Beton Nullspannungstemperaturgradient



## Spannungen im Beton Eigenspannungen



## Spannungen im Beton Schwinden und Quellen



## Spannungen im Beton Schwinden und Quellen

- Fröhschwinden, plastisches Schwinden  
Austrocknungsschwinden
- Carbonatisierungsschwinden
- chemisches bzw. autogenes Schwinden

## Frühschwinden (plastic shrinkage)



Bildquelle: <http://www.concrete.org/technical/ckc/troubleshooting/articles/56.htm>

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Spannungen im Beton chemisches, autogenes Schwinden

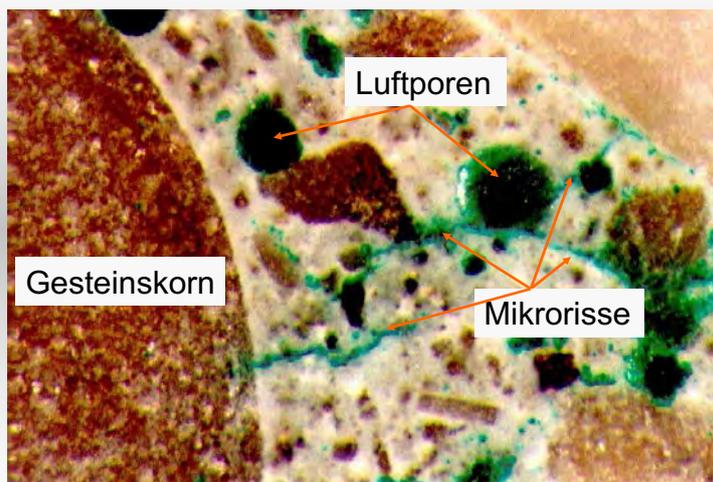
- Reaktionsprodukte haben geringeres Volumen als Ausgangsmaterialien
- Frischbeton: Betonvolumen kann sich spannungsfrei verringern
- $w/z$ -Werten  $\ll 0,40$ : Hydratation  $\Rightarrow$  Wasserentzug aus Poren:
  - innere Selbstaustrocknung (selfdesiccation),
  - Unterdruck im Porensystem bzw. Zugspannungen im Porenwasser = „Selbstaustrocknungsschwinden“

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

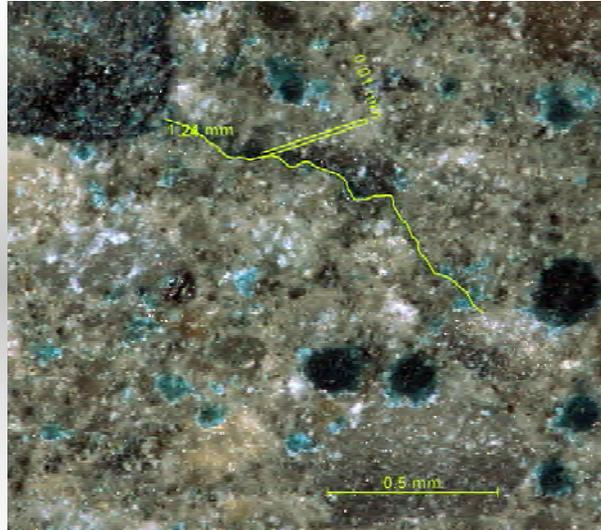
## Spannungen im Beton chemisches, autogenes Schwinden

- Nach dem Erreichen einer ausreichenden Festigkeit:
  - innere Spannungen durch chemisches Schwinden
  - keine äußere Formänderung, inneres Austrocknen  
→ Mikrorisse im Inneren
- Schwinden ohne einen Wasserverlust nach außen und trotz konstanter Temperatur:  
**„autogenes Schwinden“**

## Visualisierung der Mikrorisse

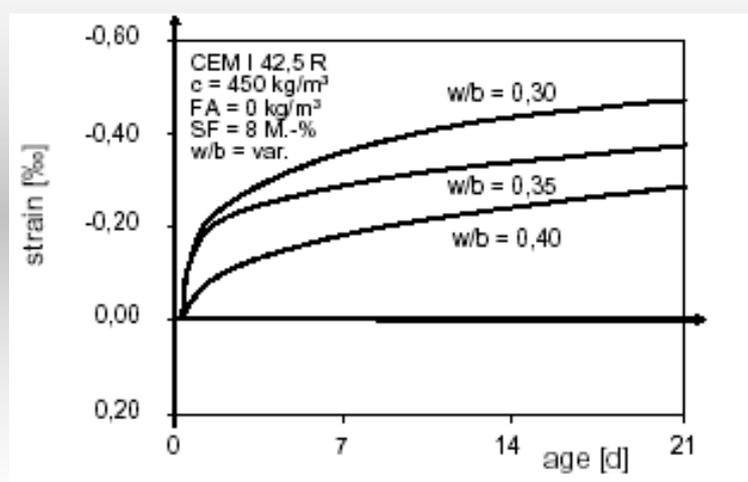


## Visualisierung der Mikrorisse



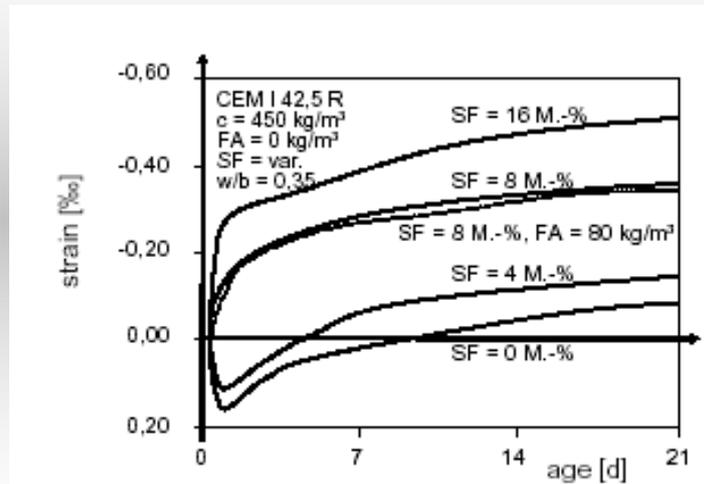
der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Spannungen im Beton chemisches, autogenes Schwinden



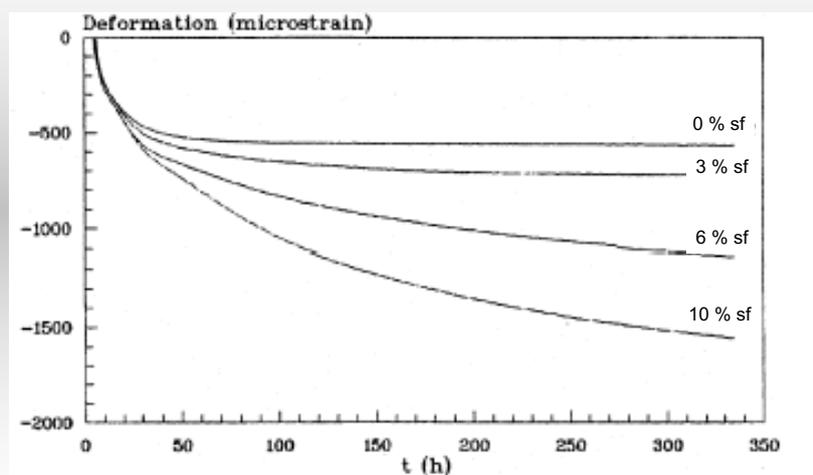
der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Spannungen im Beton chemisches, autogenes Schwinden



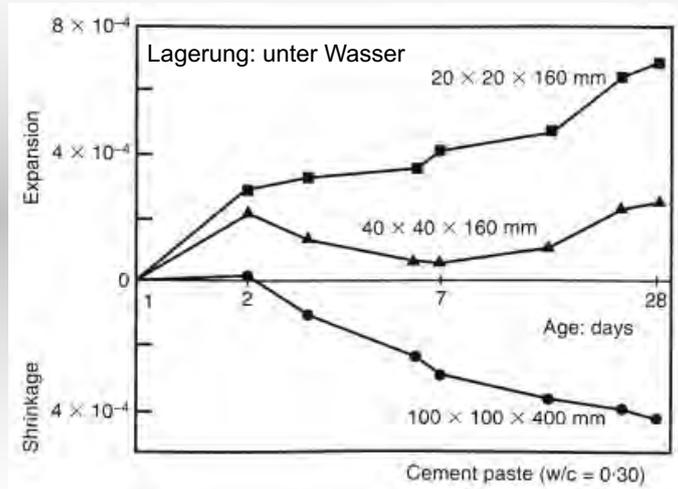
der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Spannungen im Beton chemisches, autogenes Schwinden



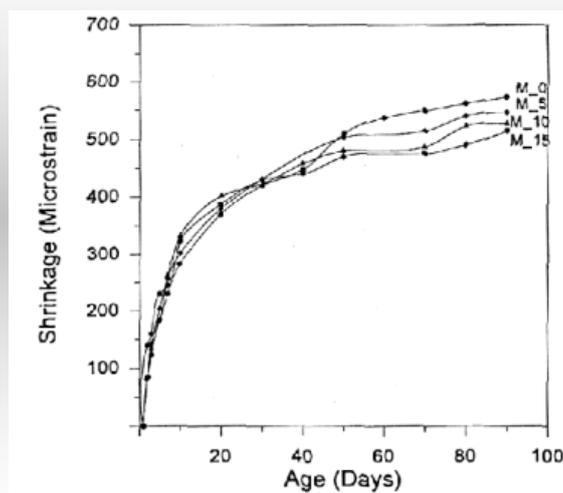
der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Spannungen im Beton chemisches, autogenes Schwinden



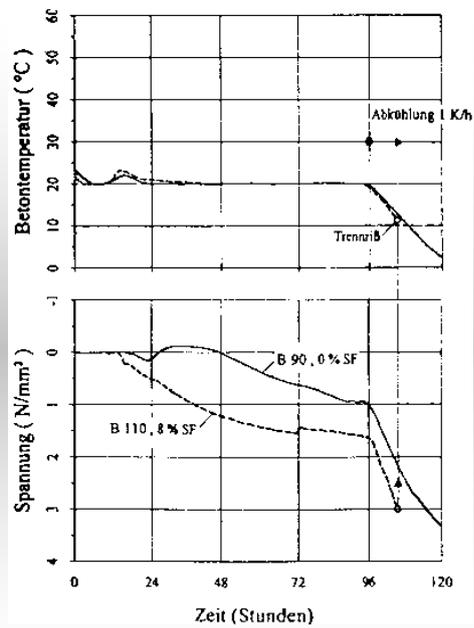
der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Austrocknungsschwinden



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

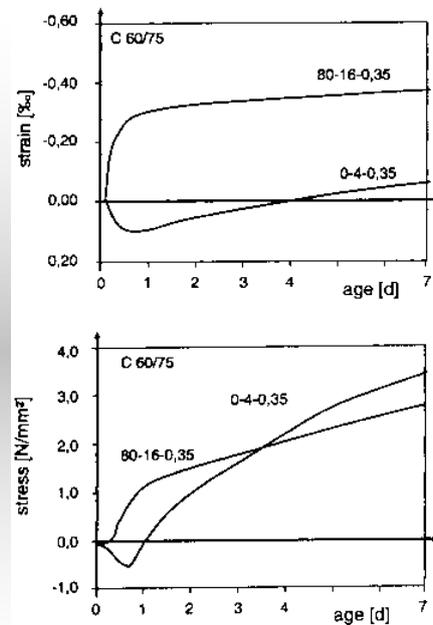
## Spannungen im Beton - chemisches, autogenes Schwinden



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

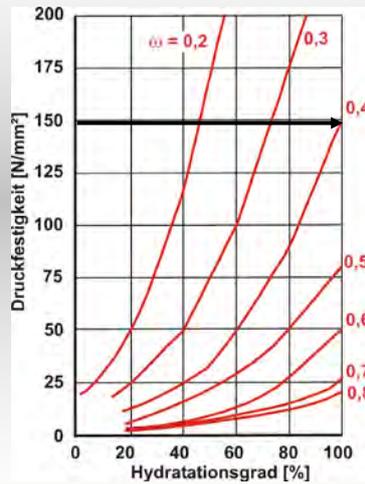
## Spannungen im Beton - chemisches, autogenes Schwinden

Bezeichnung:  
Flugaschegehalt [kg/m<sup>3</sup>] –  
Silicastaubgehalt [M.-%] –  
w/b-Wert  
Bindemittelgehalt b: 450 kg/m<sup>3</sup>



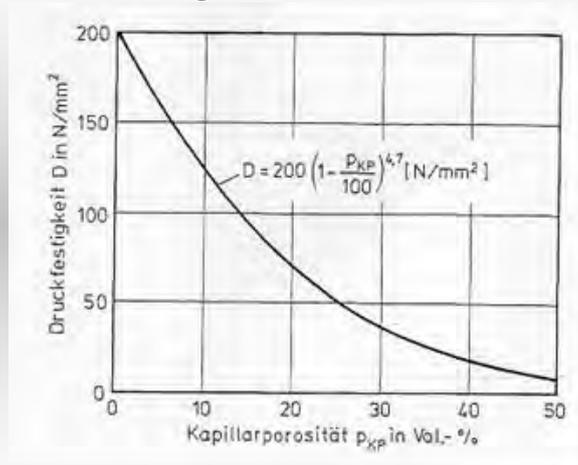
der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Einfluss des Wasserzementwertes $\omega$ und des Hydratationsgrades auf die Druckfestigkeit von Zementstein



der Bundeswehr  
**Universität München**  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

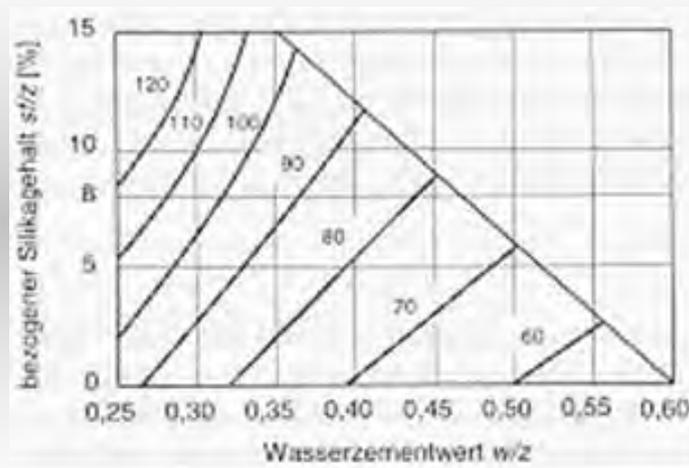
## Einfluss der Kapillarporosität auf die Druckfestigkeit von Zementstein



Aus: Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton Arten, Herstellung und Eigenschaften. Ernst & Sohn Verlag Berlin 2001

der Bundeswehr  
**Universität München**  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Druckfestigkeit ( $f_{c,cube100}$ ) in Abhängigkeit vom w/z-Wert und Silicagehalt



Aus: Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton Arten, Herstellung und Eigenschaften. Ernst & Sohn Verlag Berlin 2001

der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Hochfester Beton Zusammensetzung

Festigkeitsklasse	C55/67 – C60/75	C70/85 – C80/95	C90/105 – C105/115
Zementart	CEM I – CEM III/A	CEM I – CEM II/B-S	CEM I – CEM II/B-S
Festigkeitsklasse	32,5 R – 42,5 R	42,5 R	42,5 R
Zementmenge [kg/m <sup>3</sup> ]	340 – 380	380 – 450	450 – 500
w/b-Wert w/(z+sf+0,4·FA)	0,35 – 0,40	0,30 – 0,35	0,25 – 0,30
Silicastaubgehalt [M.-% v. Z.]	3 - 6	7 - 10	10
Steinkohlenflugasche [kg/m <sup>3</sup> ]	20 - 60	20 - 60	40 – 100
Größtkorn [mm]	16 - 32	16 - 22	11/16
Gesteinsart	quarzitisch/ karbonatisch	quarzitisch	quarzitisch
Gesteinsform	Rundkorn	0 – 2 Rundkorn 2 – 8 evtl. gebrochen 8 – 16/22 evtl. gebrochen	0 – 2 Rundkorn 2 – 16 gebrochen

der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Betonfestigkeitsklasse	C55/67 <sup>1)</sup>	C60/75 <sup>1)</sup>	C70/85 <sup>1)</sup>	C80/95 <sup>1)</sup>	C90/105 <sup>1)</sup>	C100/115 <sup>1)</sup>
CEM I 52,5 R [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	450	450
CEM I 42,5 R	-	320	380	390	-	-
CEM III 42,5	200	-	-	-	-	-
CEM III 32,5	200	-	-	-	-	-
Silica (Feststoff) S <sub>fest</sub>	-	30	30	35	40	45
Flugasche f	100	80	60	60	-	-
Wasser w	150	125	130	135	136	127
Fließmittel fm	16	12,5	15	6,0 <sup>2)</sup>	7,0 <sup>2)</sup>	9,0 <sup>2)</sup>
Verzögerer vz	-	-	-	-	-	1,8
Sand 0/2	605	640	630	625	625	620
Kies 2/8	390	400	380	400	400	-
Kies 8/16	740	780	790	-	-	-
Splitt 2/5	-	-	-	-	-	270
Splitt 5/8	-	-	-	-	-	210
Splitt 8/11	-	-	-	270	290	350
Splitt 11/16	-	-	-	490	470	420
w/b [-]	0,37	0,35	0,33	0,31	0,29	0,27
w/(z+0,4*f)	0,37	0,38	0,35	0,34	0,31	0,30
fm/z [%]	4,0	3,9	3,9	1,5	1,6	2,0
Rohdichte ρ	2,40	2,39	2,42	2,41	2,42	2,50

*Universität München*  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Prüfung der Druckfestigkeit

- Für jeden verwendeten Beton der Überwachungsklassen 2 und 3 sind mindestens 3 Proben zu entnehmen und zwar:
  - bei Überwachungsklasse 2 jeweils für höchstens 300 m<sup>3</sup> oder je 3 Betoniertage;
  - bei **Überwachungsklasse 3** jeweils für höchstens 50 m<sup>3</sup> oder je ein Betoniertag;
  - wobei diejenige Anforderung, welche die größte Anzahl von Proben ergibt, maßgebend ist.

## Annahmekriterien für die Druckfestigkeit

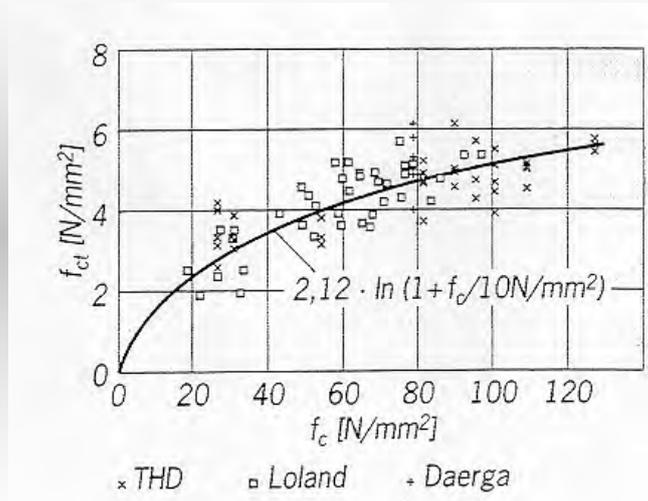
Spalte		Kriterium 1		Kriterium 2	
Zeile		Kriterium 1		Kriterium 2	
Anzahl „n“ der Einzelwerte		Beton der Überwachungs-klassen 1 und 2	Beton der Überwachungs-klasse 3	Beton der Überwachungs-klassen 1 und 2	Beton der Überwachungs-klasse 3
		Mittelwert von „n“ Einzelwerten $f_{cm}$ N/mm <sup>2</sup>		Jeder Einzelwert $f_{ci}$ N/mm <sup>2</sup>	
1	3 bis 4	$\geq f_{ck} + 1$		$\geq f_{ck} - 4$	$\geq 0,9 f_{ck}$
2	5 bis 6	$\geq f_{ck} + 2$		$\geq f_{ck} - 4$	$\geq 0,9 f_{ck}$
3	7 bis 34	$f_{cm} \geq f_{ck} + \left(165 - \frac{2,58}{\sqrt{n}}\right) \sigma$ $\sigma = 4$		$\geq f_{ck} - 4$	$\geq 0,9 f_{ck}$
4	$\geq 35$	$f_{cm} \geq f_{ck} + \left(165 - \frac{2,58}{\sqrt{n}}\right) \sigma$ $\sigma \geq 3$ $\sigma \geq 5$		$\geq f_{ck} - 4$	$\geq 0,9 f_{ck}$

$f_{ck}$  die charakteristische Druckfestigkeit des verwendeten Betons  
 $\sigma$  der Schätzwert der Standardabweichung der Grundgesamtheit

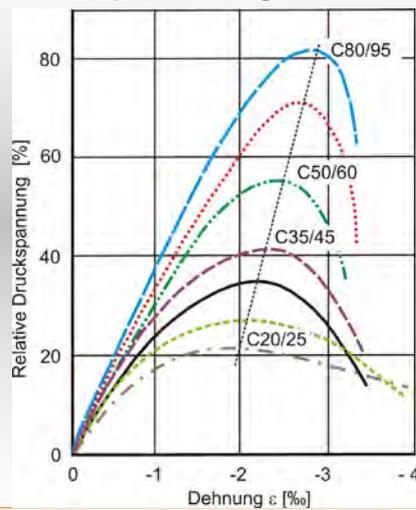
## Hochfester Beton Mechanische Eigenschaften

- Hochfester Beton ist im Allgemeinen spröder als Normal-Beton.  
Steiler Abfall des  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramms bei Druckbelastung.
- Bei steigender Druckfestigkeit steigt die Zugfestigkeit von hochfesten Betonen nicht oder nur sehr wenig an.
- Einzelverformungen und Schwindverformungen sind deutlich geringer als bei Normalbeton.

## Zugfestigkeit



## Festbetoneigenschaften HFB Druckfestigkeit Spannungs-Dehnungslinie





## Festigkeits- und Formänderungskennwerte für hochfesten Beton (DIN EN 1992)

Kenngröße	Festigkeitsklassen														
	12 <sup>a</sup>	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
$f_{ck}$	12 <sup>a</sup>	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
$f_{ck, cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	115
$f_{cm}$	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108
$f_{ctm}$	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5	5,2
$f_{ctk, 0,05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7
$f_{ctk, 0,95}$	2	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6	6,3	6,6	6,8
$E_{c0m}$	25 800	27 400	28 800	30 500	31 900	33 300	34 500	35 700	36 800	37 800	38 800	40 600	42 300	43 800	45 200
$E_{cm}$	21 800	23 400	24 900	26 700	28 300	29 900	31 400	32 800	34 300	35 700	37 000	39 700	42 300	43 800	45 200
$\epsilon_{ct}$	-1,8	-1,9	-2,1	-2,2	-2,3	-2,4	-2,5	-2,55	-2,6	-2,65	-2,7	-2,8	-2,9	-2,95	-3,0
$\epsilon_{ct1u}$	-3,5								-3,4						
$n$	2,0								2,0						
$\epsilon_{ct2}$	-2,0								-2,03						
$\epsilon_{ct2u}$	-3,5								-3,1						
$\epsilon_{ct3}$	-1,35								-1,35						
$\epsilon_{ct3u}$	-3,5								-3,1						

## Festbetoneigenschaften HFB Druckfestigkeit Spannungs-Dehnungs-Linie

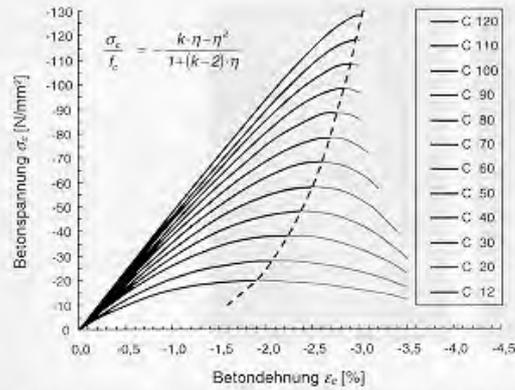
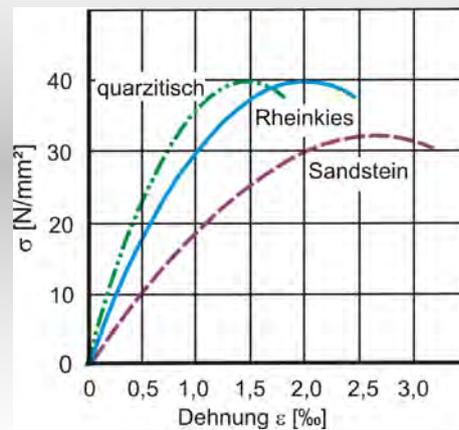
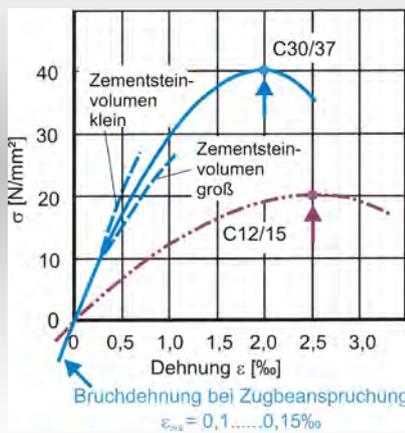


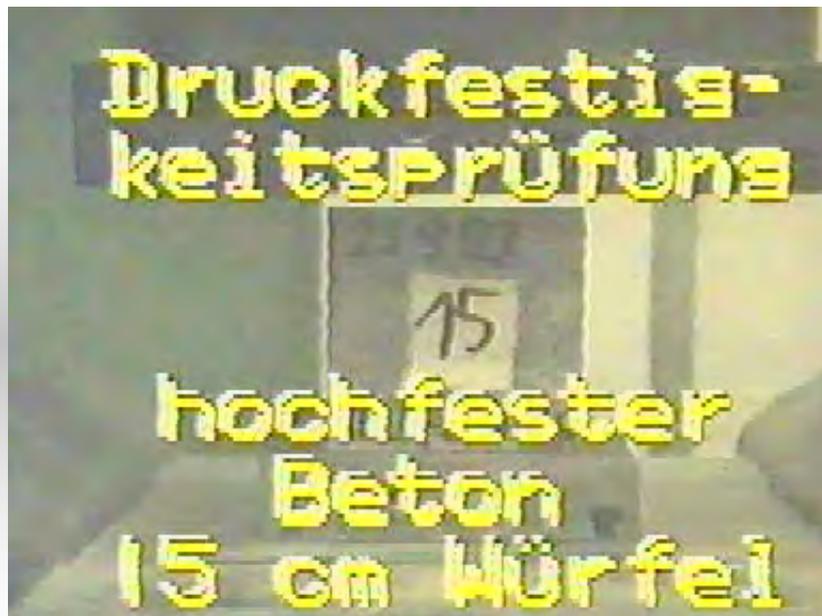
Bild 3.11 Spannungs-Dehnungsbeziehung für Beton unterschiedlicher Festigkeiten

## Festbetoneigenschaften HFB Elastizitätsmodul Einflüsse



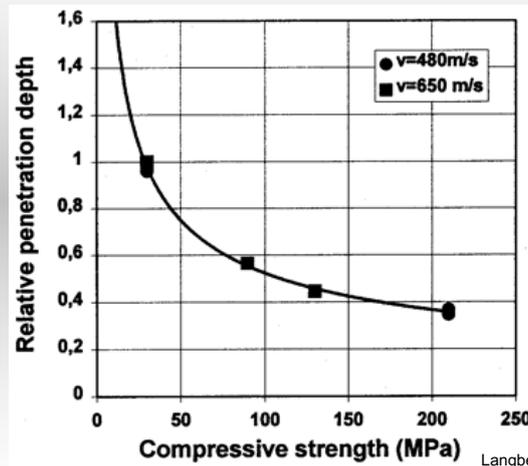


der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

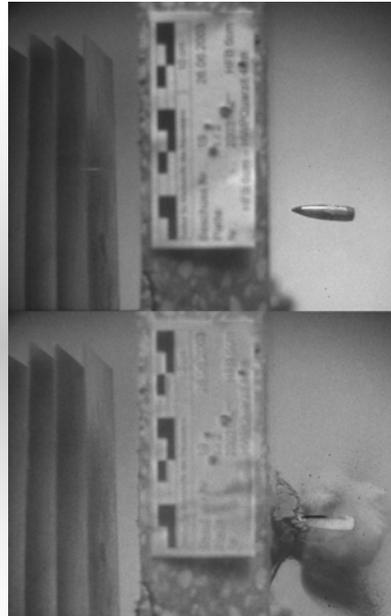
## Beschussversuchen mit 75 mm Projektilen



Langberg, H., Markeset, G.; 1999

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## HFB Verhalten unter hochdynamischer Belastung



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Versuchsaufbau



Impact (7.62x54R)  
aus 50 m und  
100 m Entfernung



HFB Platte

t = 6 / 10 / 15 cm



4 Deutbleche

(à 1mm)

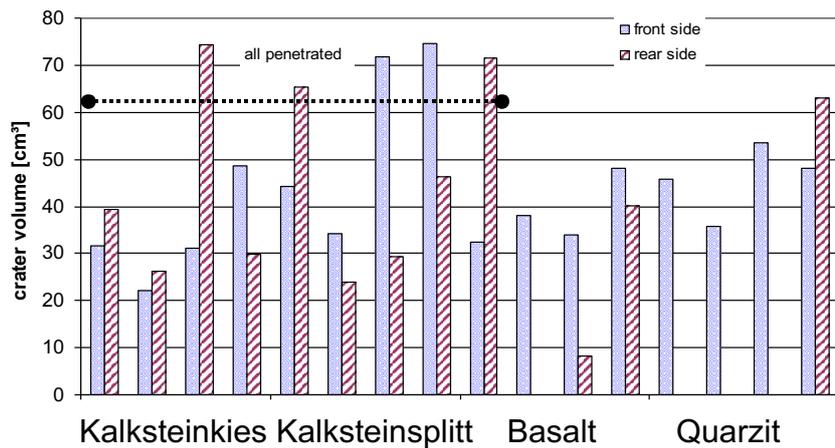
$V_5 \sim 890 \text{ m/s}$

$v_{45} \sim 870 \text{ m/s}$

$v_{95} \sim 840 \text{ m/s}$

der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Variation der Gesteinskörnungsart im HFB



der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## HFB, Plattendicke 6 cm



Kalkstein ohne Fasern



Quarzit mit Fasercocktail

der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## HFB, Quarzitkörnung, Fasercocktail



Plattendicke 6 cm



10 cm



15 cm

der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

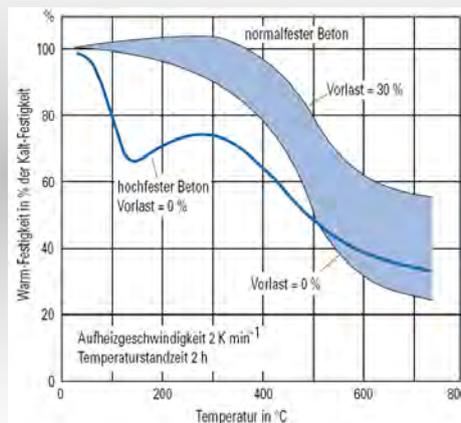
## Dauerhaftigkeit Transportmechanismen

Hochfeste Betone zeichnen sich durch ihre **Dichtheit** aus (besonders bei Einsatz von Silikastaub).

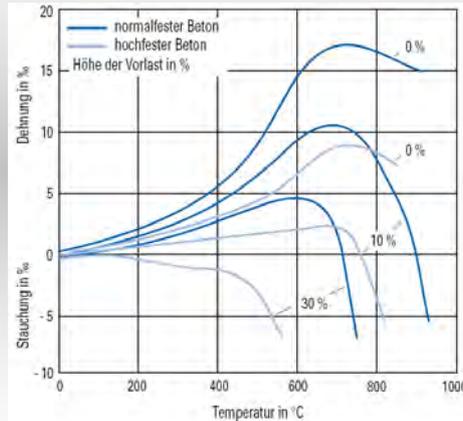
Daher ist, sachgerechte Herstellung vorausgesetzt, eine **hohe Dauerhaftigkeit** zu erwarten.

- hoher Widerstand gegen chemischen Angriff
- hoher Frostwiderstand
- Da der Einsatz von Silikastaub vor allem im höheren Betonalter zu einem hohen Verbrauch an Calciumhydroxid führt, kann dies zu einem Absinken des pH-Wertes führen. So kann es zur Depassivierung der Stahoberfläche kommen. Aufgrund der hohen Dichtheit ist aber unklar, ob mit Stahlkorrosion zu rechnen ist.

## Hochfester Beton Brandverhalten - Festigkeit

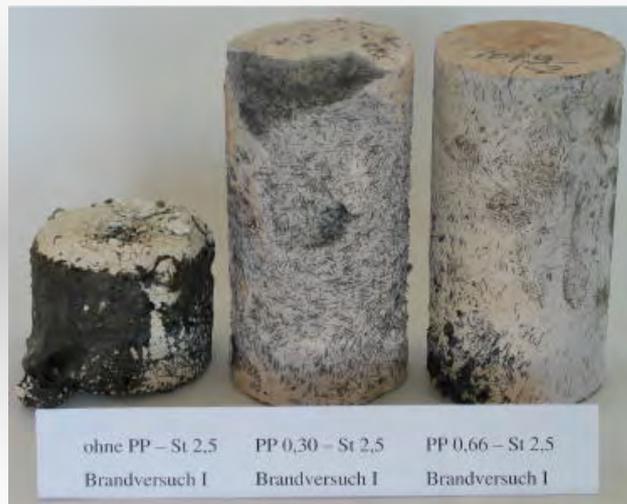


## Hochfester Beton Brandverhalten - Verformung



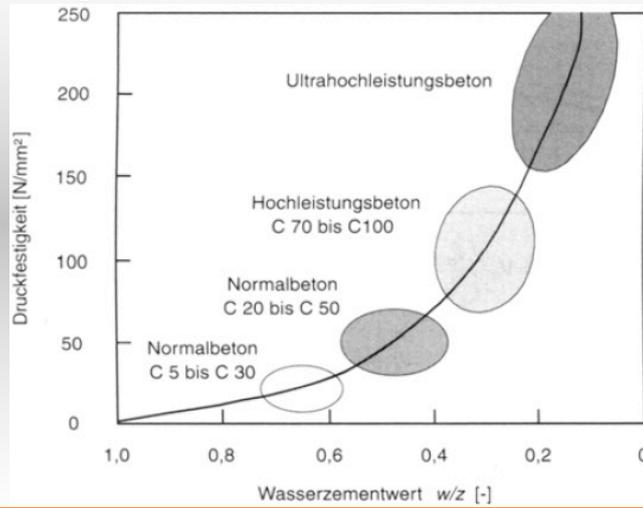
der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## HFB Verhalten bei Brandbelastung



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

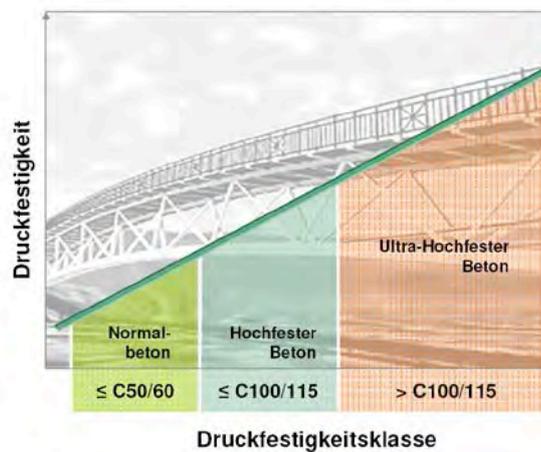
## Ultrahochfester Beton –UHFB oder Ultra High Performance Concrete UHPC



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

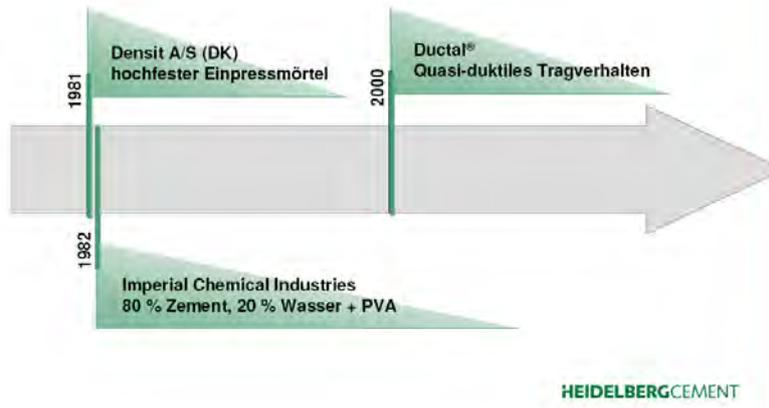
## Was ist UHPC?

Ultra High Performance Concrete - Ultra-Hochfester Beton



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## ■ Historie



## ■ Eigenschaften von UHPC

Eigenschaft	UHPC (Beispiel)	Normalbeton
Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,45 – 2,55	2,2 – 2,5
Druckfestigkeit [MPa]	180 – 220	10 - 60
Biegezugfestigkeit [MPa]	36 – 40	2 - 8
Zugfestigkeit [MPa]	8 – 10	1 - 4
E-Modul [GPa]	55 – 60	20 - 40

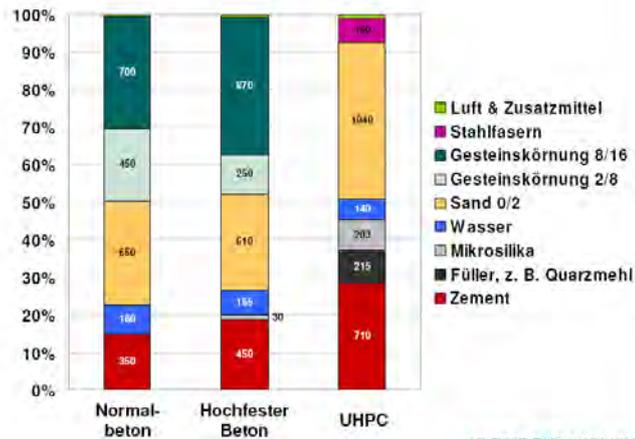
## ■ Eigenschaften von UHPC

Die hohe Festigkeit beruht auf:

- niedrigem w/z-Wert
- dichter Packung & homogenem Gefüge
- optimierter Zusammensetzung
- Einsatz von Fasern
- Warmbehandlung

HEIDELBERGCEMENT

## ■ Zusammensetzung



HEIDELBERGCEMENT

## Typische Zusammensetzungen von UHPC

UHFB		M1 Q <sup>9)</sup>	B1 Q <sup>10)</sup>	M1	M5	BPR200	Ductal
1	2	3	4	5	6	7	8
Quelle		[3.10]	[3.10]	[3.67]	[3.67]	[3.23]	[3.15]
Zement	kg/m <sup>3</sup>	733 <sup>1)</sup>	580 <sup>1)</sup>	700 <sup>2)</sup>	700 <sup>2)</sup>	950 <sup>3)</sup>	710
Quarzsand		1008 <sup>4)</sup>	354 <sup>4)</sup>	1280 <sup>5)</sup>	1174 <sup>5)</sup>	997 <sup>6)</sup>	1020
Basalt 2/8		–	711	–	–	–	–
Silikastaub		230	177	140	140	237	203
Stahlfasern		192	194	–	200	146	160
Polypropylenfasern		–	–	–	2	–	Mikrofasern 170
Feinquarz / Quarzmehl		183 <sup>7)</sup>	325 <sup>7)</sup>	70	70	–	215
FM	–	131 <sup>8)</sup>	–	–	–	–	
Wasser	l/m <sup>3</sup>	28,6	30,4	21	21	17	Zusatzmittel 17
		160	148	175	175	180	140

1) CEM I 52,5 HS  
2) CEM I 42,5 R HS  
3) Portlandzement CPA 55 HPS  
4) 0,125/0,50 mm

5) 0,06/1,0 mm  
6) Silikatischer Sand  
7) < 0,09 mm: 55 M.-%  
8) < 0,09 mm: 100 M.-%

9) Größtkorn 1,0 mm  
10) Größtkorn 8 mm

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## UHPC Mischungsbestandteile



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

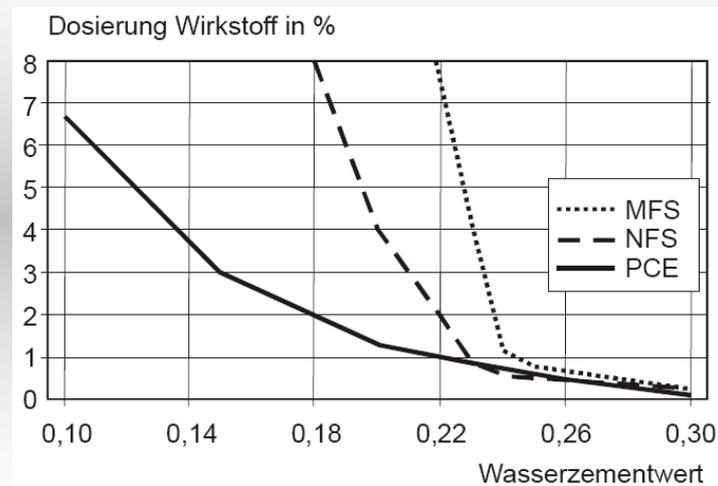
## ■ Aufgabe der einzelnen Ausgangsstoffe

- Zement: Festigkeitsentwicklung  
Verarbeitbarkeit
- Silikastaub: Festigkeitsentwicklung  
Verbund
- Quarzsand: Verarbeitbarkeit  
Reaktion der Quarzoberflächen  
Begrenzung des Schwindens
- Fließmittel: Reduzierung des w/z-Wertes
- Stahlfasern: Biegezugfestigkeit  
Behinderung der Querdehnung (DF ↑)
- Organische Fasern: Erhöhung des Feuerwiderstands  
Verminderung des autogenen Schwindens

HEIDELBERGCEMENT

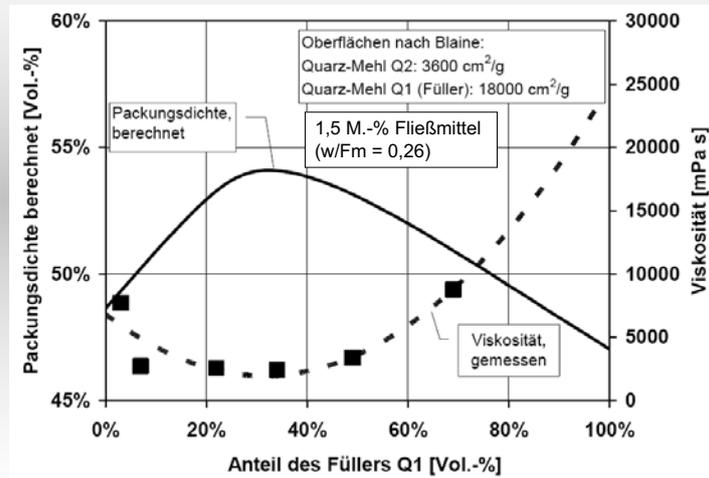
der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Notwendige Fließmitteldosierung zum Erreichen einer definierten Konsistenz



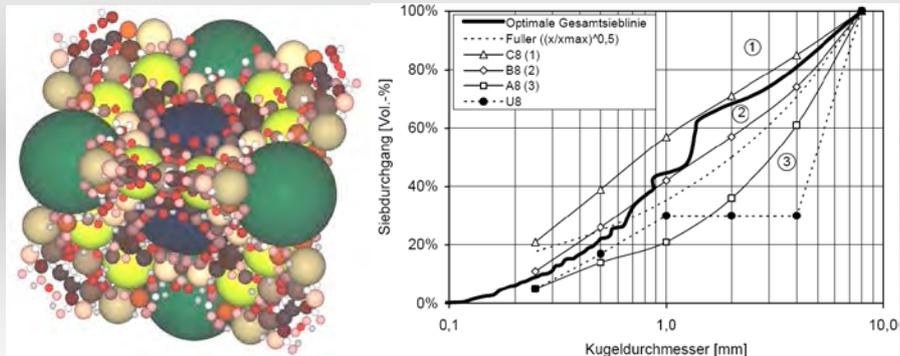
der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Konsistenz



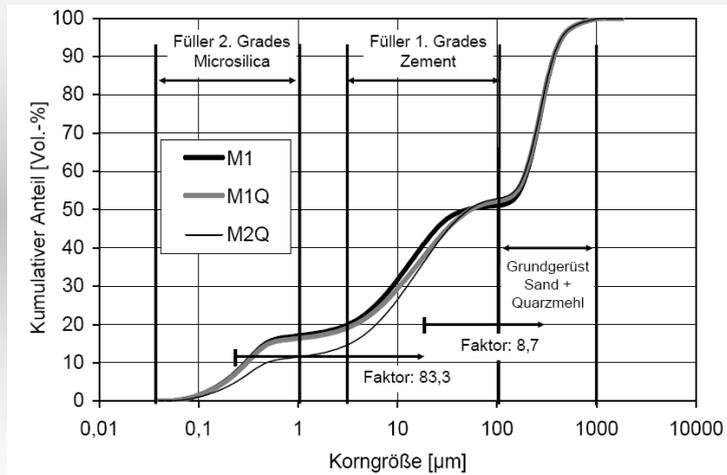
der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Optimierte Packung der Gesteinskörnung

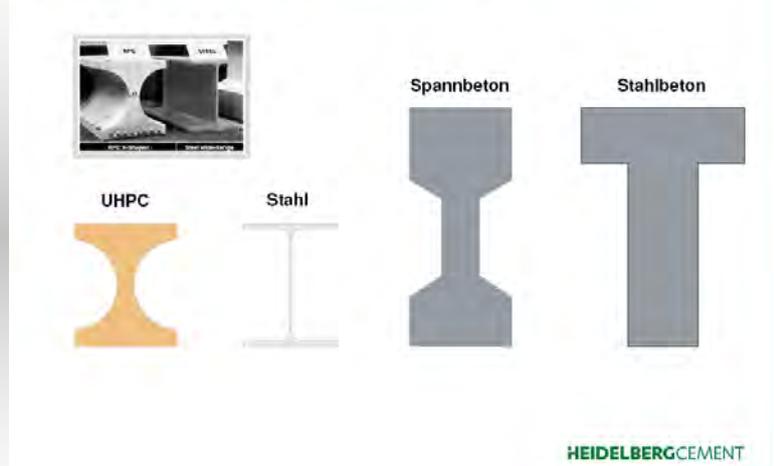


der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Kornzusammensetzung von UHPC mit unterschiedlichen Füllern



## ■ Dimensionierung – Träger gleicher Tragfähigkeit



## ■ Eigenschaften von UHPC

Baustoff	UHPC	Stahl	Spann- beton	Stahl- beton
				
Trägerhöhe	360 mm	360 mm	700 mm	700 mm
Gewicht	130 kg/m	110 kg/m	470 kg/m	510 kg/m

HEIDELBERGCEMENT

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

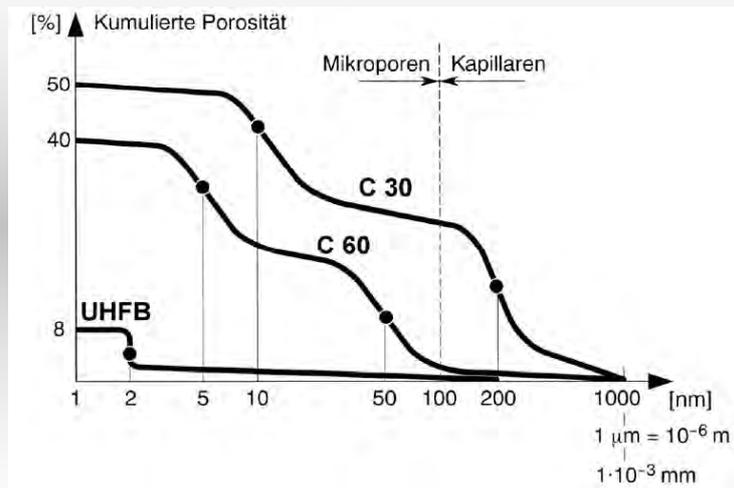
## ■ Materialkosten

- UHPC 700 - 1000 €/m<sup>3</sup> (0,30 - 0,40 EUR/kg)
- Normalbeton 50 - 75 EUR/m<sup>3</sup>
- Stahl 0,65 EUR/kg

HEIDELBERGCEMENT

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Porosität von UHFB im Vergleich zu Normalbeton



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Herstellen von UHPC

- Hochleistungsmischer (ggf. mit Vakuum)
- Mischreihenfolge:
  - trockene Bestandteile
  - Wasser mit Fließmittel (eventuell vorgemischt)
  - Fasern erst nachdem Fließmittel wirken
- Mischzeit: 10 – 15 min.
- Temperaturanstieg beachten (viel Zement)



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Entmischen durch zu viel FM und zu hohe Temperatur



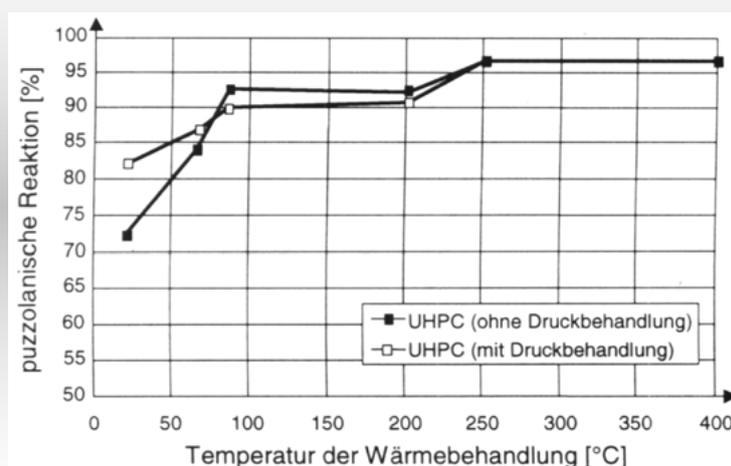
## Nachbehandlung



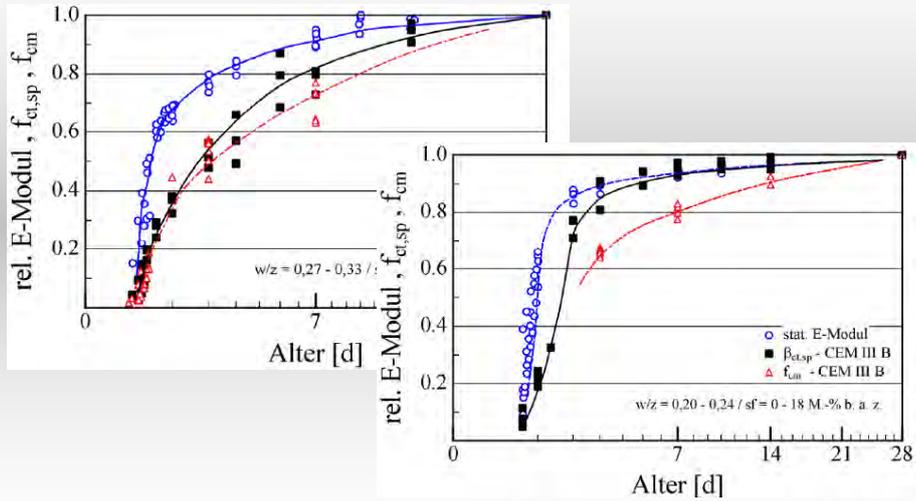
## Wärmebehandlung

- Zunächst 24 h vorlagern und dabei feucht halten
- 2 Tage bei 70 ° C bis 90 ° C ohne / mit Druck
- Alternativ:
  - ein bis sieben Tage bei 40 ° C bis 160 ° C
  - eine Wärmebehandlung bis 250 ° C ist möglich
- Wichtig: langsam Aufheizen und Abkühlen

## Wärmebehandlung

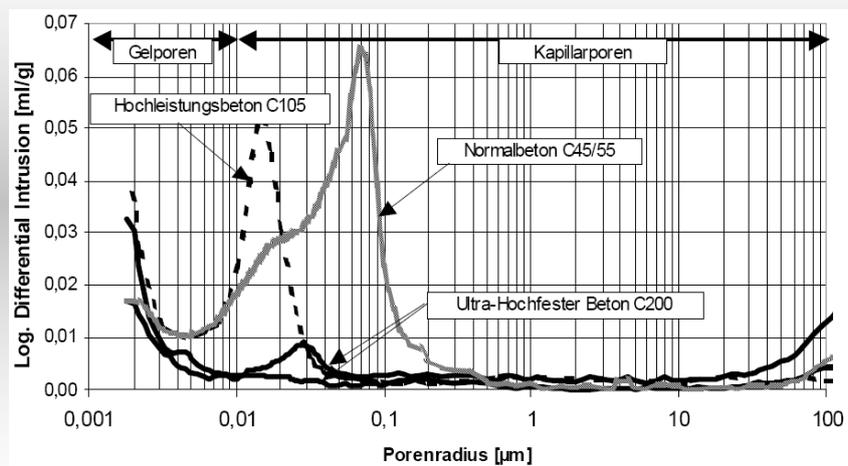


## Eigenschaften im jungen Alter



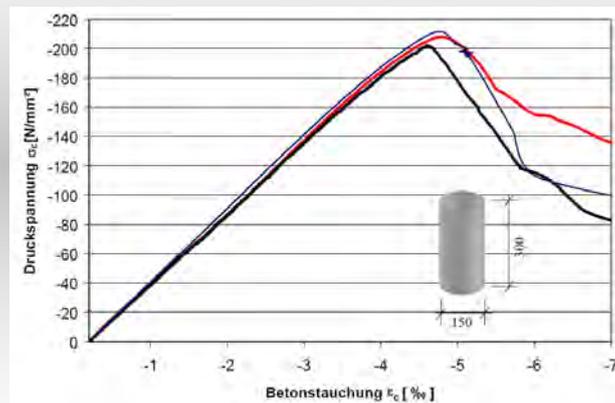
der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Gefüge



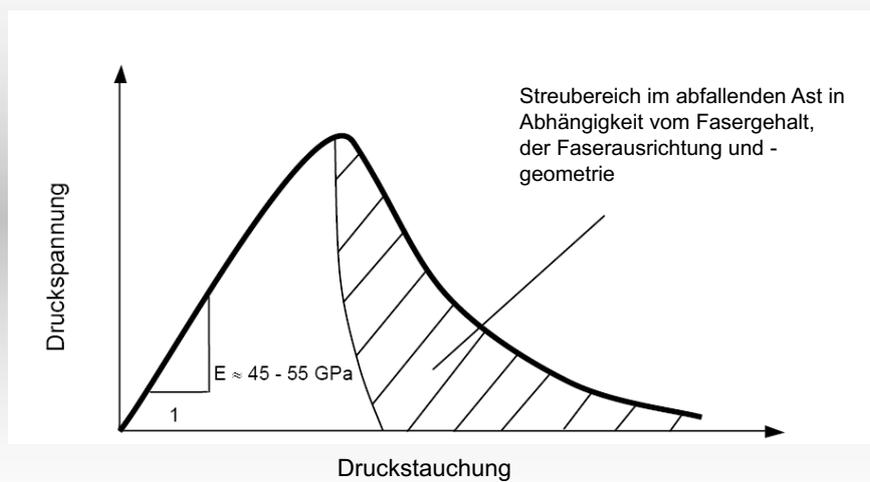
der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Spannungs-Dehnungs-Linie



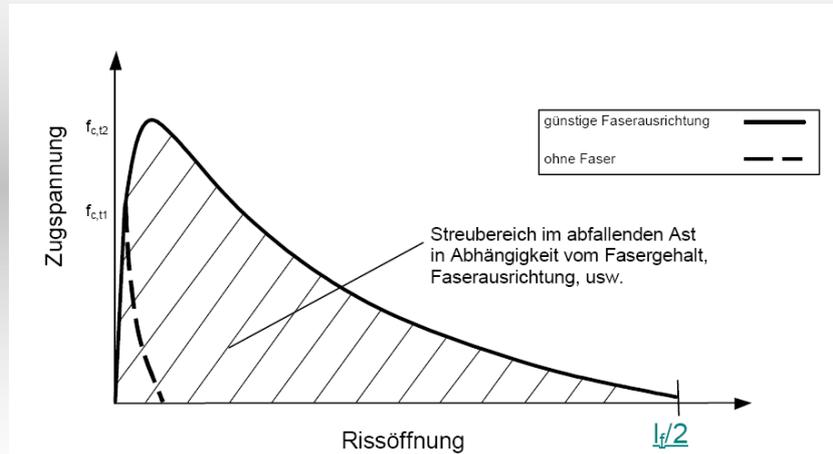
der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Spannungs-Dehnungs-Linie

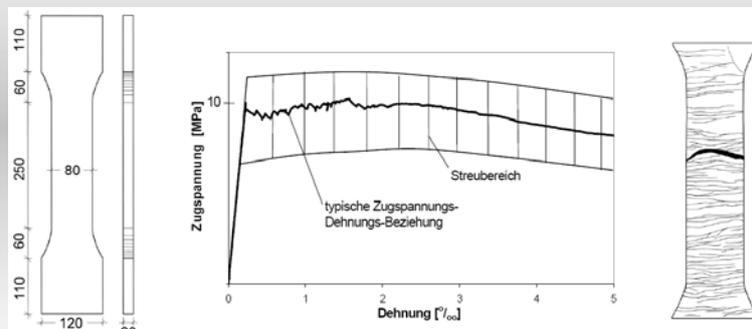


der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

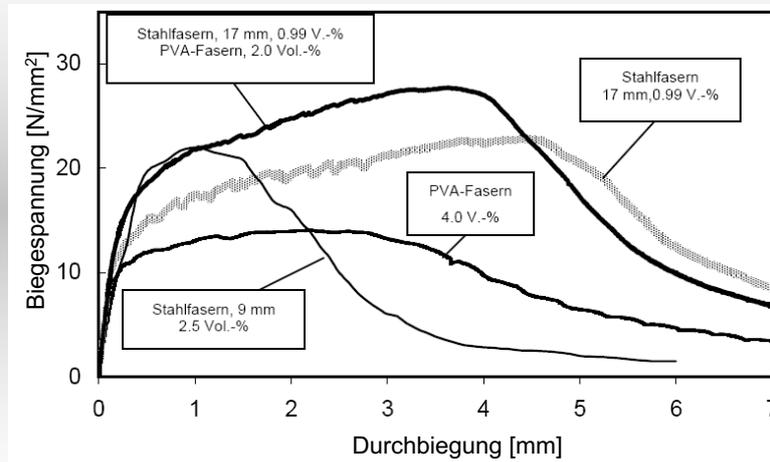
# Spannungs-Dehnungs-Linie



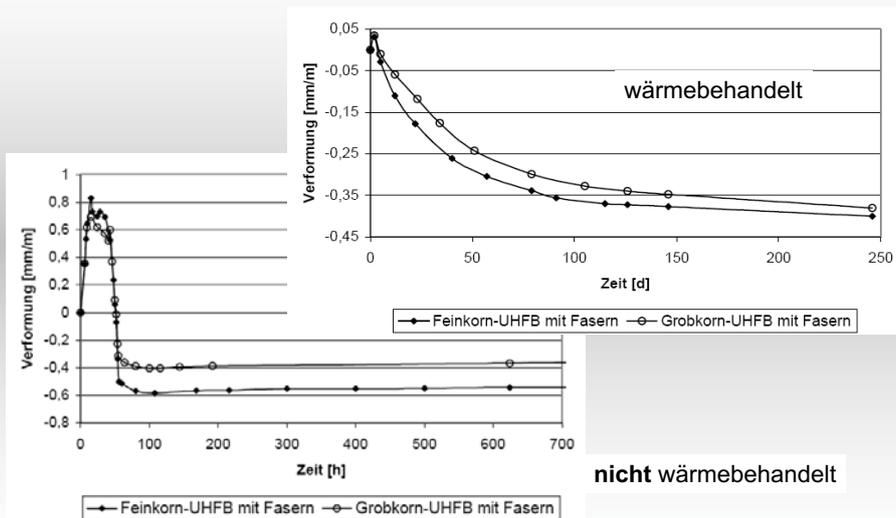
# Duktiler Beton



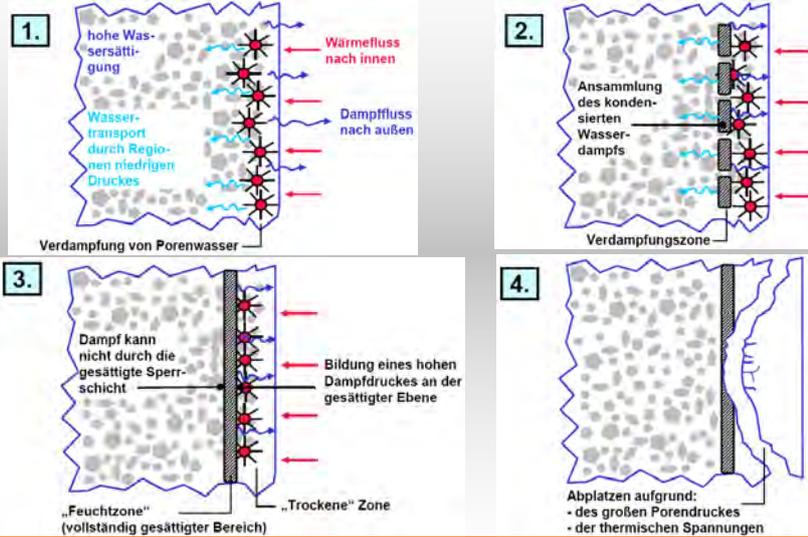
## Duktiler Beton



## Schwinden

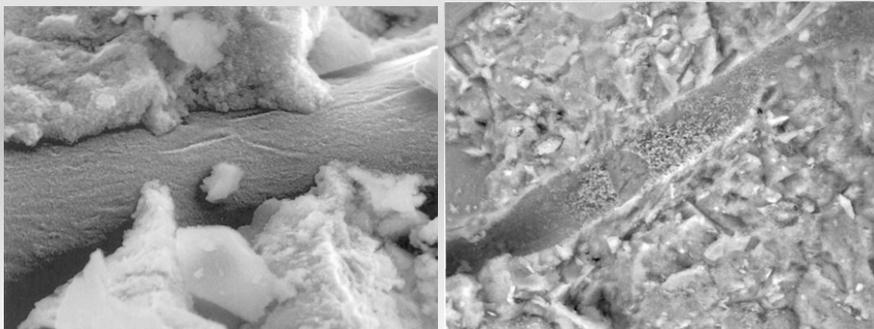


## Brandverhalten



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Wirkung von PP-Fasern

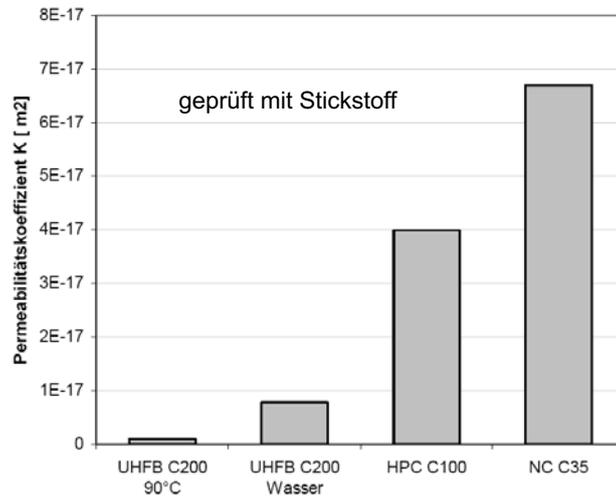


Intakte PP-Faser (Bildbreite 30  $\mu\text{m}$ )

PP-Faserhhlung (Bildbreite 120  $\mu\text{m}$ )

der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Dauerhaftigkeit



## Dauerhaftigkeit

	Chlorid-Ionen Diffusionskoeffizient [ $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ]		
	UHPC	HPC	NB
Gemessen bei einfacher Migration	0,0	5,0	6,5
Steady-state Diffusionskoeffizient	0,02	0,5	1,0

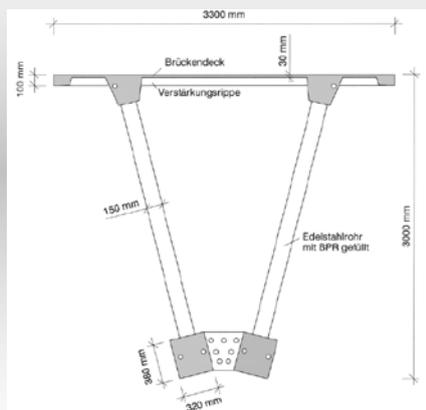
## Fußgängerbrücke Sherbrooke, Kanada 1997



Spannweite: 60 m

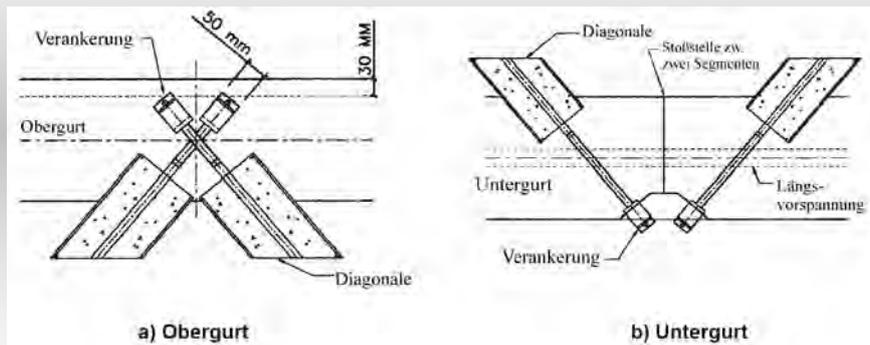
der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Fußgängerbrücke Sherbrooke Querschnitt und externe Vorspannung



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Fußgängerbrücke Sherbrooke Verbindungstechnik



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Fußgängerbrücke Sherbrooke Montage



der Bundeswehr  
Universität  München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Vergleich dreier Lösungen für die Fußgängerbrücke von Sherbrooke hinsichtlich der Umweltverträglichkeit

		Normalbeton	Hochfester Beton	Ultrahochfester Beton
äquivalente Dicke	[mm]	500	400	150
Volumen	[m <sup>3</sup> ]	126	100	33
Zementgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	330	450	700
Zementverbrauch + CO <sub>2</sub> -Emission	[t]	44	48	28
Zuschlagverbrauch	[t]	225	170	60

### ■ Anwendung

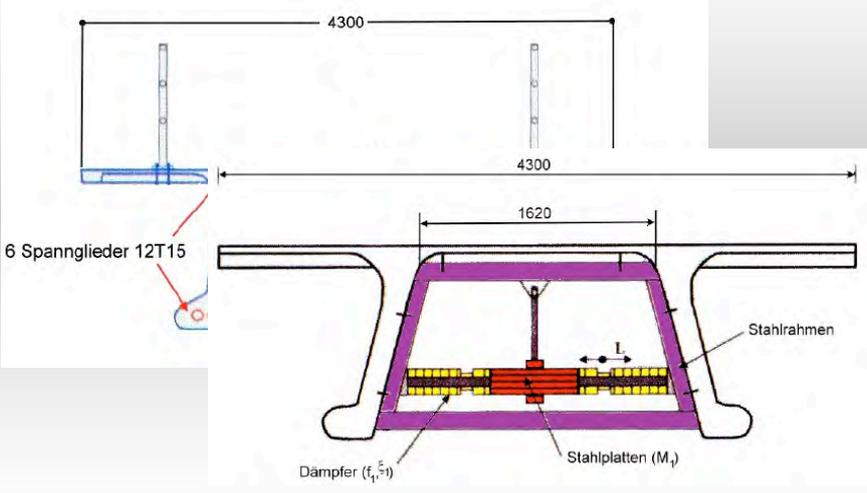
Seonyu Footbridge, Seoul Südkorea  
 Spannweite 120 m

2002



HEIDELBERGCEMENT

# Seonyu Fußgängerbrücke Querschnitt



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## ■ Anwendung

Sakata-Mirai Footbridge, Japan  
 Spannweite 50 m

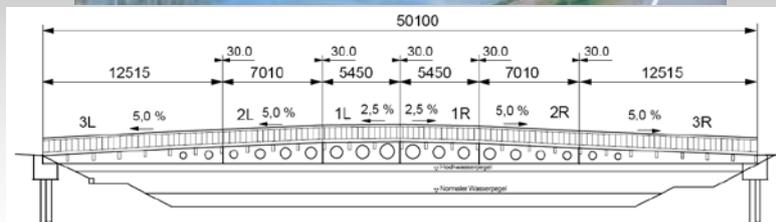
2004



HEIDELBERGCEMENT

der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Sakata-Mirai Fußgängerbrücke in Sakata



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

### ■ Anwendung

Gärtnerplatzbrücke Kassel, Deutschland  
 Länge 120 m

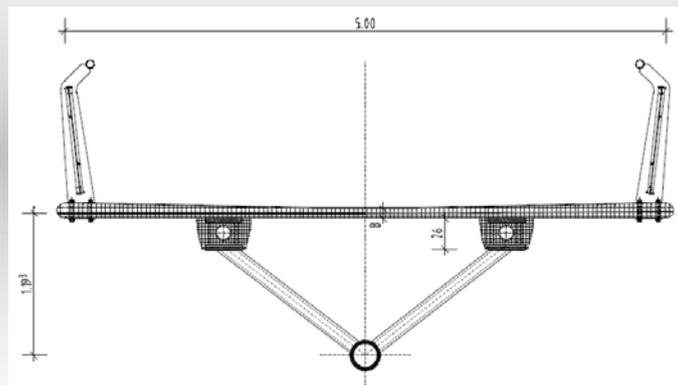
2007



HEIDELBERGCEMENT

der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Gärtnerplatzbrücke, Kassel Querschnitt



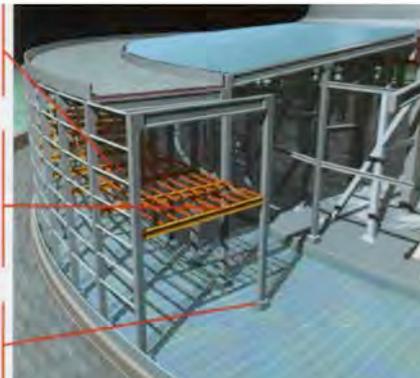
der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Vorteil Dauerhaftigkeit Kühlturm Cattenom

Ankommende Luft ruft Eisbildung hervor. BPR ist unempfindlich gegenüber Frost und Tau.

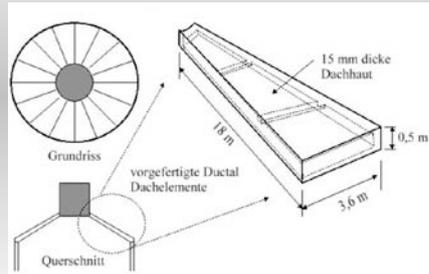
Jeder Kühlturm hat 90 radial angelegte Balken, auf denen insgesamt 800 Träger aufgelegt sind.

Die Träger aus BPR sind dreimal leichter als die alten, d.h. die Fundamente mussten nicht geändert werden.



der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Klinkersilo Lafarge-Werk Joppa, USA Vorteil Gewicht



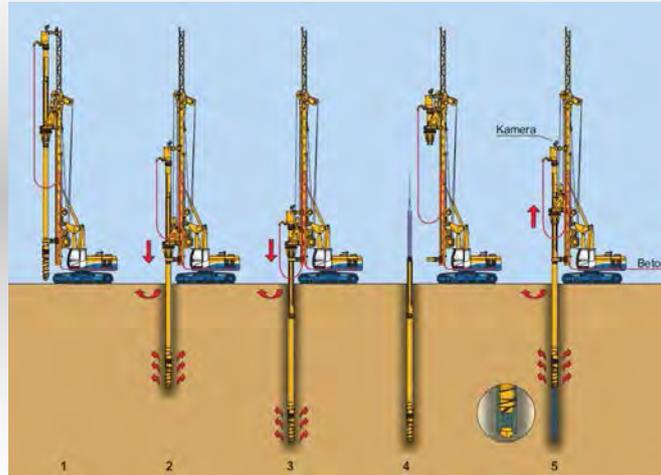
der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

## Ankerplatten II de Reunion Vorteil Dauerhaftigkeit



der Bundeswehr  
Universität München  
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

# UHPC-Bohrpfahlspitze



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

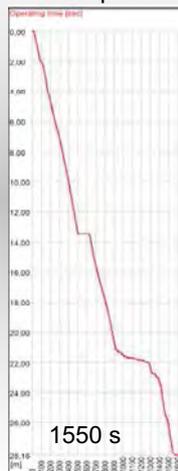


# UHPC-Bohrpfahlspitze



Bohrpfahldurchmesser: 620 mm  
 Bohrtiefe: 28,2 m

Stahlspitze



UHPC-Spitze



der Bundeswehr  
 Universität  München  
 Institut für Werkstoffe des Bauwesens

