

Einfluss der Prüfkörpergeometrie auf die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen an ultrahochfestem Beton (UHFB)

Torsten Leutbecher, Philipp Riedel
Lehrstuhl für Massivbau
Universität Siegen

Gliederung

1. Einführung

2. Stand des Wissens

3. Das DAfStb-Forschungsvorhaben V 497

4. Erkenntnisse

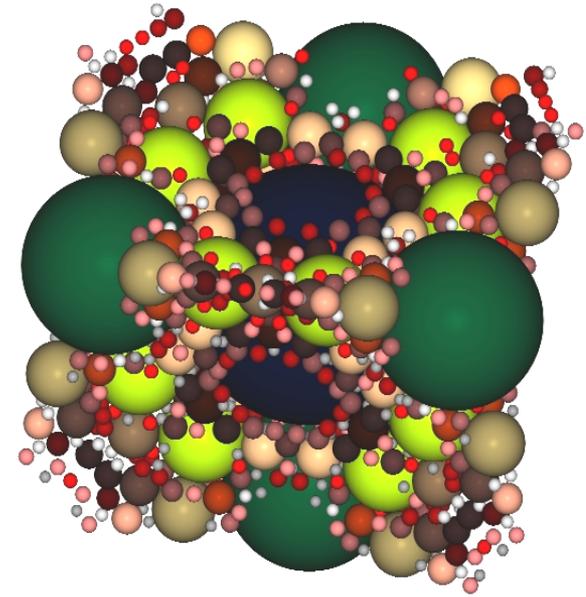
Was ist „ultrahochfester“ Beton?

Voraussetzungen („3 Faktoren“):

- Wasser-Bindemittelwert $\leq 0,25$
- hohlraumarme Kornpackung
- hochwirksame Betonzusatzmittel

Ergebnis:

- hohe Druckfestigkeit ($> C100/115$)
- hoher Widerstand gegen physikalische/chemische Angriffe

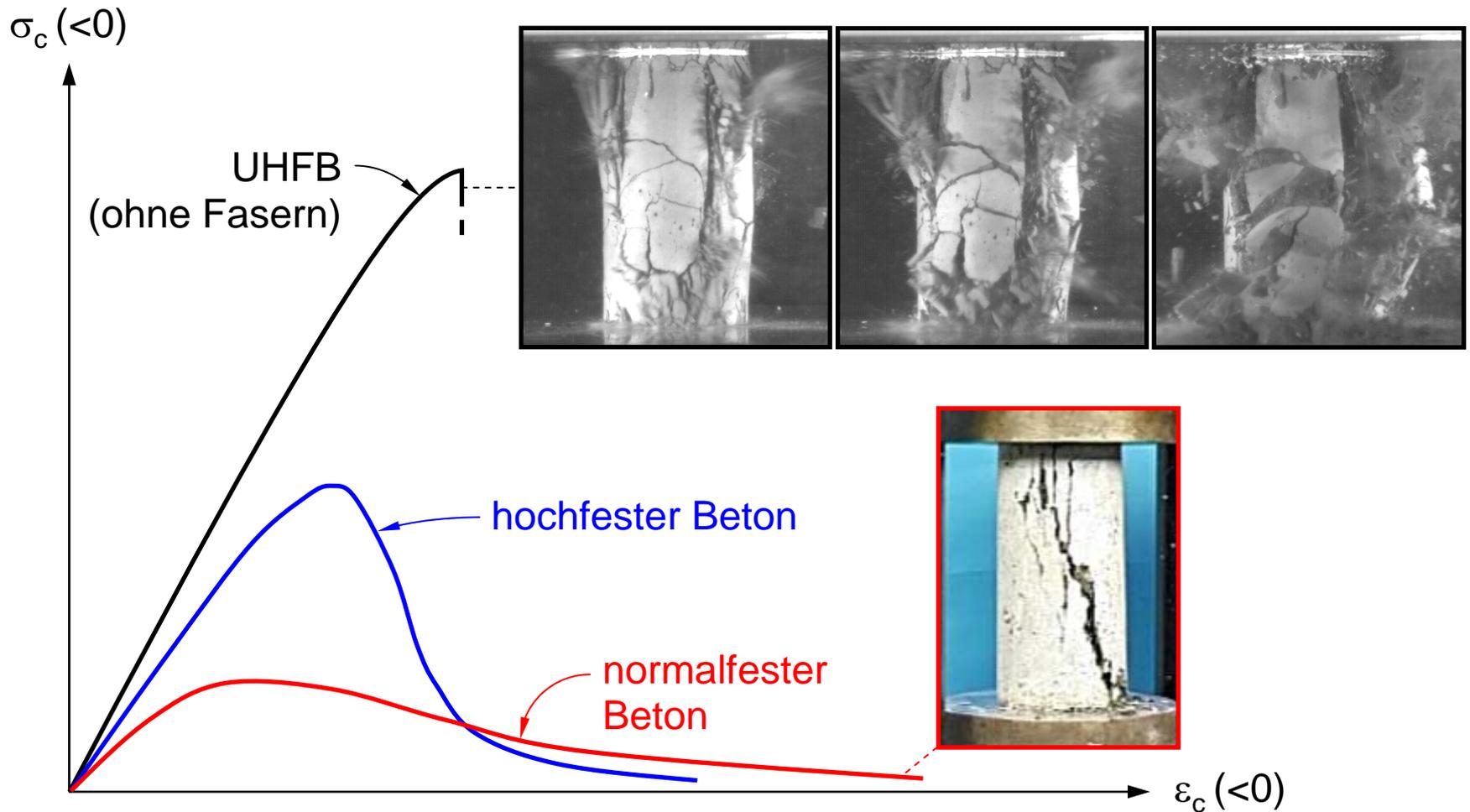


Ultra High Performance Concrete (UHPC)

Ultrahochleistungsbeton (UHLB)

Ultrahochfester Beton (UHFB)

Verhalten im Druckversuch



Steuerung des Nachbruchverhaltens durch Fasern

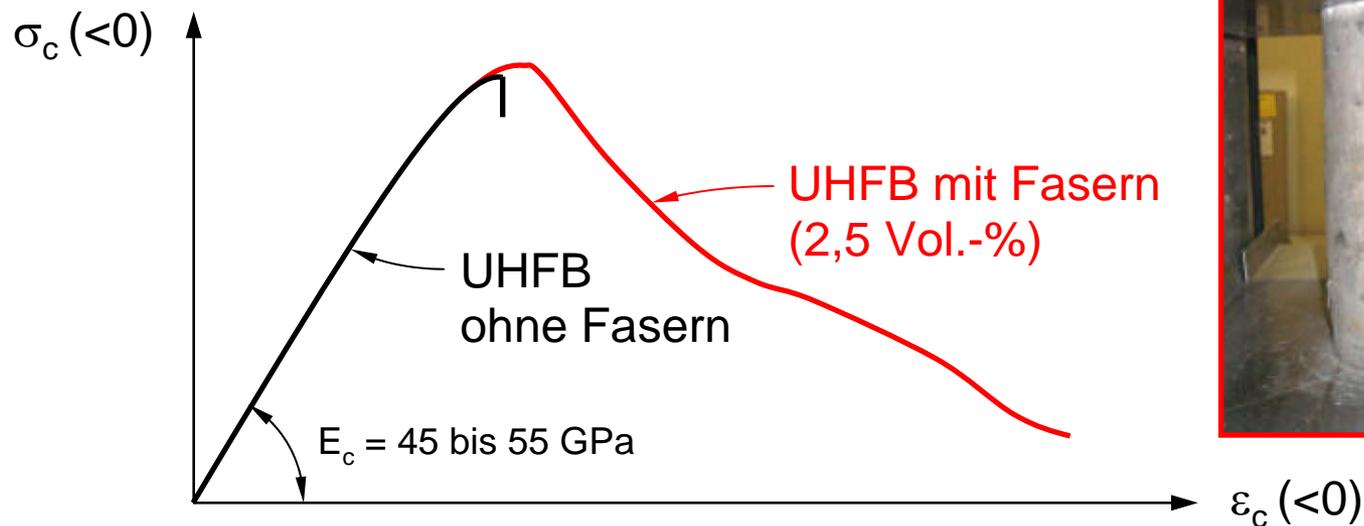


Stahldrahtfasern

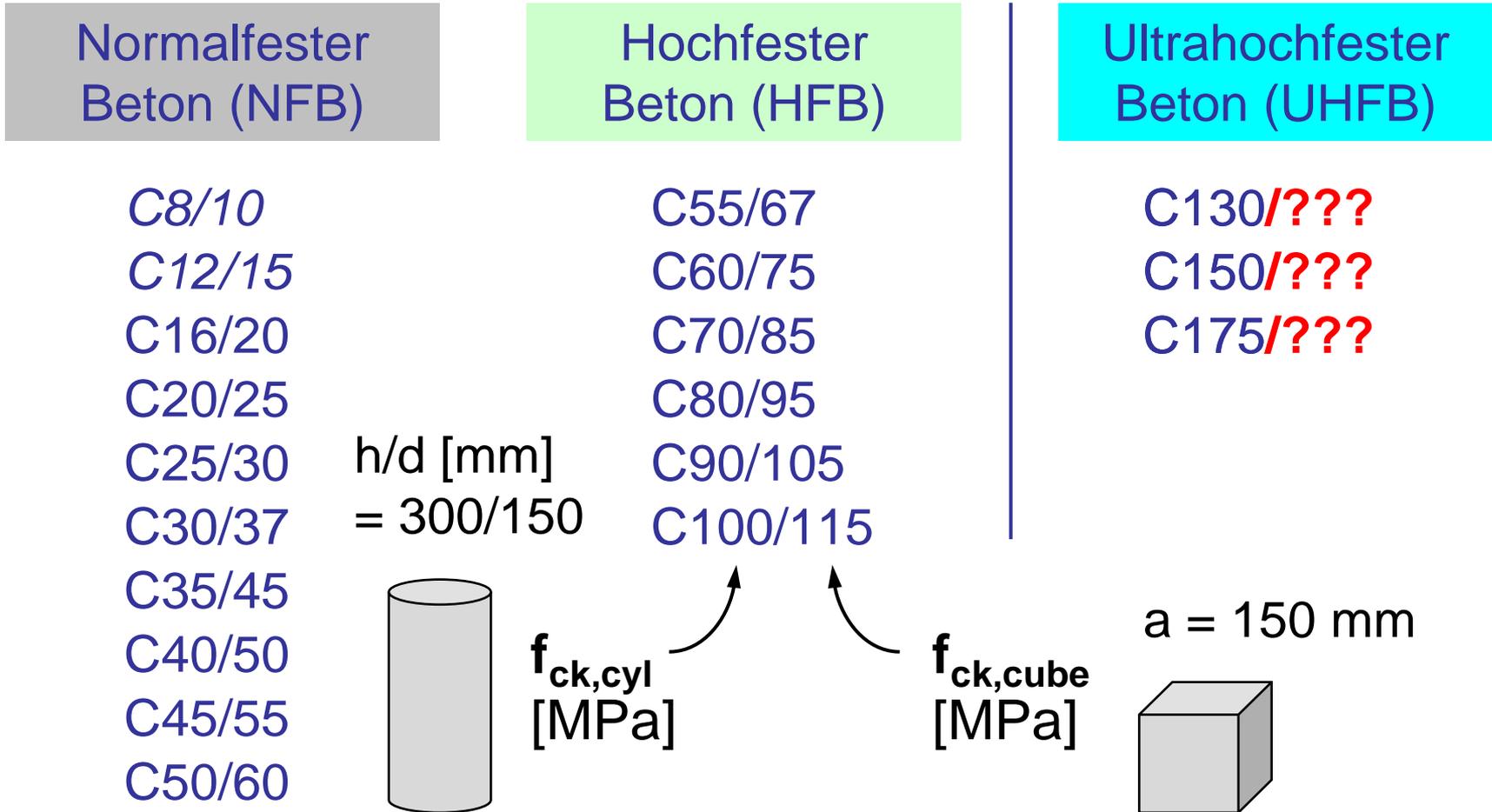
Länge: 9 bis 20 mm

Durchmesser: 0,10 bis 0,25 mm

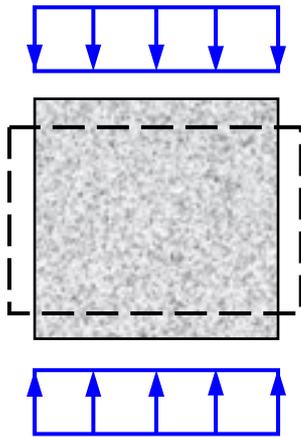
Fasergehalt: 0,5 bis 2,5 Vol.-%



Klassifizierung der Betone (DIN EN 206)

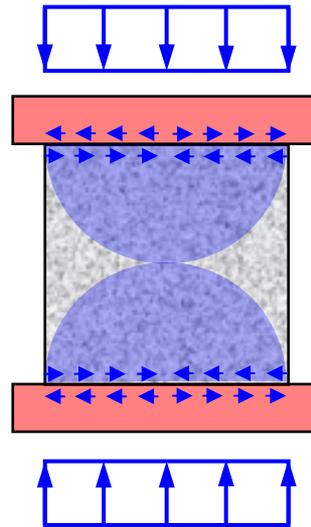


Einfluss der Prüfkörperschlankheit auf die Beanspruchung des Betons im Druckversuch



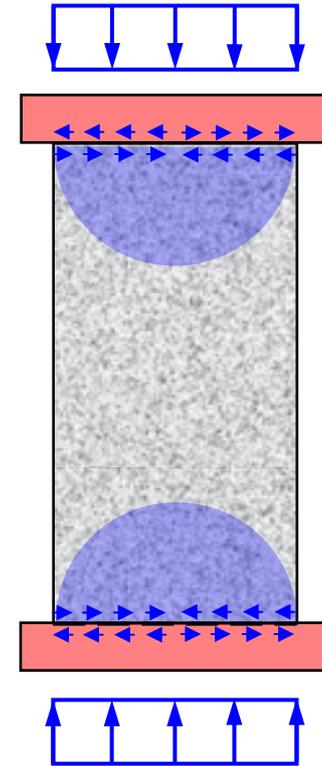
keine Behinderung der Querdehnung

→ einaxialer Druckspannungszustand

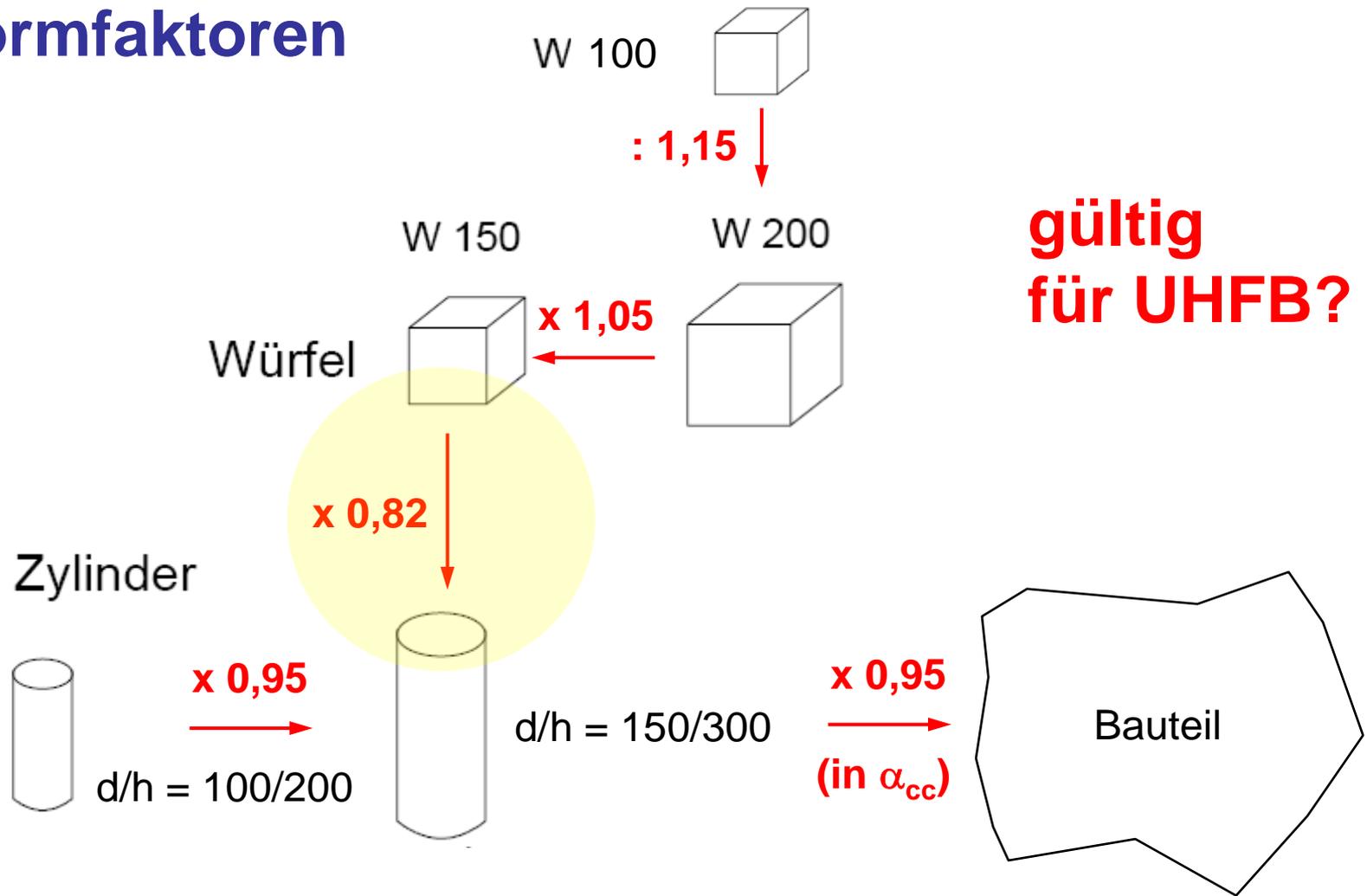


starker ... weniger starker Einfluss aus ...
... Querdehnungsbehinderung durch Druckplatten

→ mehr oder weniger stark ausgeprägter dreiaxialer Druckspannungszustand



Formfaktoren



Graybeal und Davis (2008)

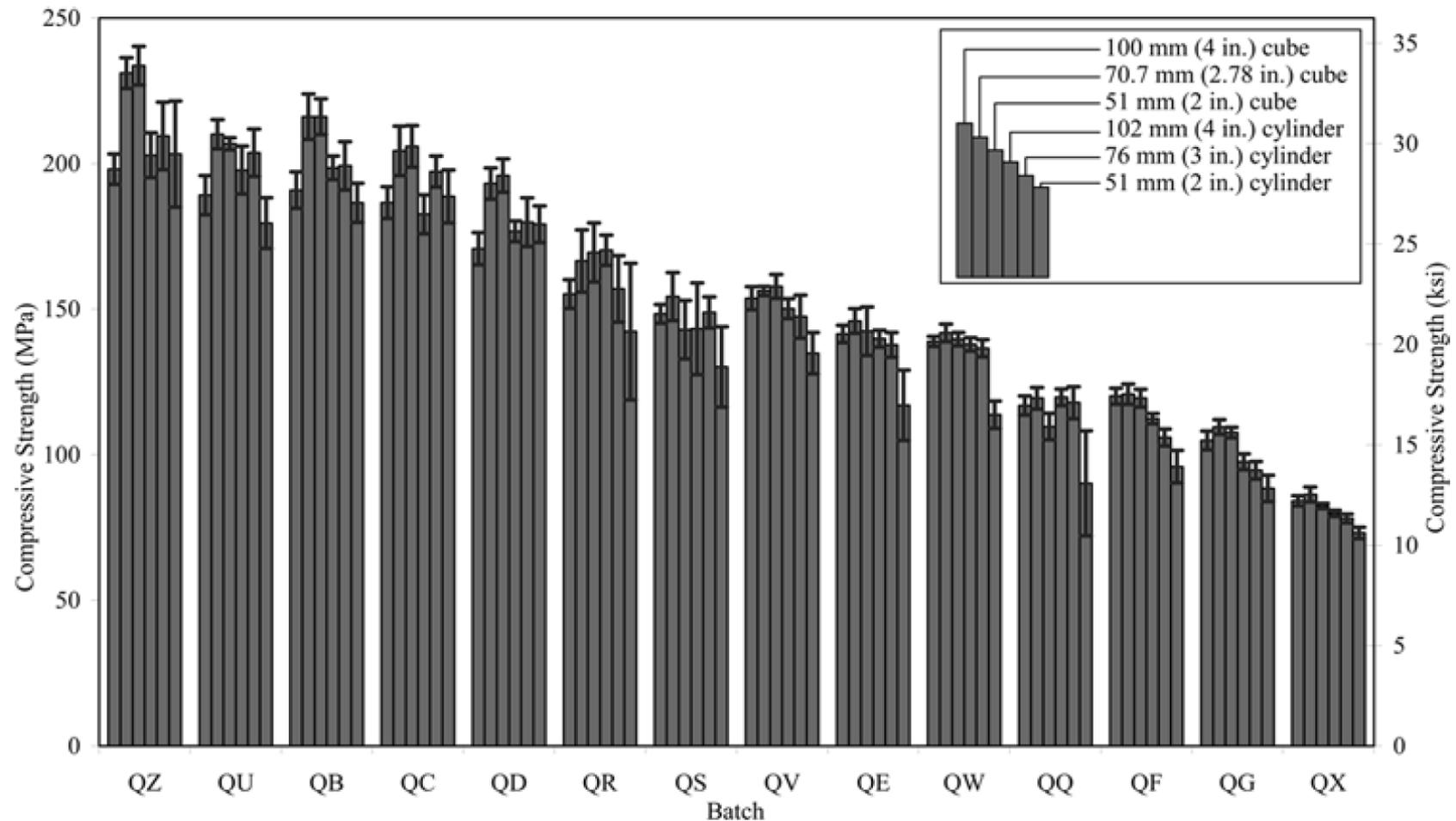
- 14 Serien mit $80 \text{ MPa} \leq f_{\text{cm,cyl}} \leq 200 \text{ MPa}$ ohne / mit 2,0 Vol.-% Fasern
- **Standardabweichung der Druckfestigkeit bis zu 19 MPa**

Batch	Type	Size. mm	Compressive strength		
			Average, MPa	Standard deviation, MPa	Coefficient of variation
QR	Cube	100	155.2	4.3	0.0396
	Cube	70.7	166.6	4.7	0.0304
	Cube	51	169.5	10.2	0.0611
	Cylinder	102	170.3	4.9	0.0290
	Cylinder	76	157.0	10.9	0.0692
	Cylinder	51	142.3	18.9	0.1328
QS	Cube	100	148.4	9.6	0.0569
	Cube	70.7	154.4	3.1	0.0207
	Cube	51	143.0	7.8	0.0507
	Cylinder	102	143.3	15.0	0.1046
	Cylinder	76	148.9	5.1	0.0344
	Cylinder	51	130.2	13.1	0.1009
	Cube	100	116.9	2.2	0.0158
	Cube	70.7	119.4	3.1	0.0268
	Cube	51	100.7	3.5	0.0304

$f_{\text{cm,cyl}} > f_{\text{cm,cube}}$ (for QR batch, comparing 100mm cube and 102mm cylinder)

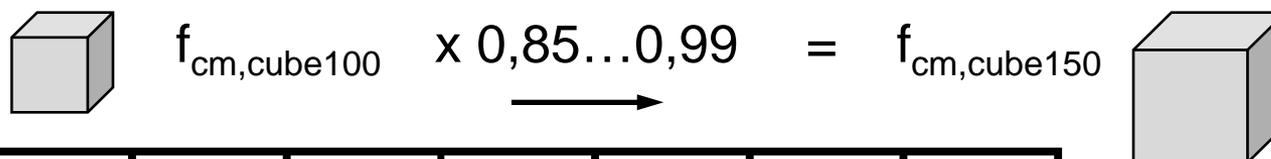
$f_{\text{cm,cyl}} < f_{\text{cm,cube}}$ (for QS batch, comparing 100mm cube and 102mm cylinder)

Würfel- und Zylinderdruckfestigkeiten (Graybeal und Davis)



Fládr, Broukalová und Bílý (2013)

- 7 Serien mit $100 \text{ MPa} \leq f_{\text{cm,cube}} \leq 180 \text{ MPa}$ mit 1,25 / 2,5 Vol.-% Fasern
- **Standardabweichung der Druckfestigkeit bis zu 12 MPa**



Batch	A		B		C		D		E		F		G	
Specimen size [mm]	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100
Specimen 1	101	115	106	121	109	120	133	139	139	146	144	130	178	168
Specimen 2	98	116	102	118	106	124	132	138	144	143	145	152	177	173
Specimen 3	98	115	103	121	118	127	132	137	140	143	129	142	170	191
Specimen 4									143	143				
Specimen 5									143	148				
Specimen 6									143	142				
Average compressive strength	99	116	104	120	111	124	133	138	142	145	139	141	175	177
Coefficient	0,852		0,867		0,897		0,960		0,981		0,985		0,987	

Fröhlich und Schmidt (2014)

- **Ringversuch** im Rahmen des **DFG-SPP 1182**
„Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton“
- Feinkorn- (M2Q) und Grobkorn-UHFB (B5Q) mit 2,5 Vol.-% Fasern
- **Standardabweichung** der Druckfestigkeit bis zu **13 MPa**

Mixture	Specimen	Number of specimens	Mean of compressive strength [MPa]	Standard deviation [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
M2Q	cube	113	172.2	13.3	139.1	197.6
M2Q	cylinder	251	154.3	13.0	110.2	180.9
B5Q	cube	93	187.4	9.9	142.8	200.7
B5Q	cylinder	176	168.3	11.5	130.1	189.2

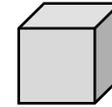
$$f_{\text{cm,cyl}} \approx 0,90 \cdot f_{\text{cm,cube}}$$

→ **definierte Randbedingungen** (Herstellung – Lagerung – Vorbereitung – Prüfung) notwendig, um Streuungen zu begrenzen!

Französische Norm NF P 18-470



h/d [mm]
= 220/110



$a = 100$ mm

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres	Résistance caractéristique minimale indicative sur cubes
	f_{ck-cyl} MPa	$f_{ck-cube}$ MPa
BFUP 130 / 145	130	145
BFUP 150 / 165	150	165
BFUP 175 / 190	175	190
BFUP 200 / 215	200	215
BFUP 225 / 240	225	240
BFUP 250 / 265	250	265

$$f_{ck,cyl} = f_{ck,cube} - 15 \text{ MPa als „Anhaltswert“}$$

DAfStb-Forschungsvorhaben V 497

Teilprojekt B – Einfluss der Prüfkörpergeometrie
auf die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen an UHFB

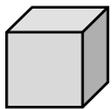
- Beteiligte:
- **Universität Siegen** (federführend)
Lehrstuhl für Massivbau
Prof. Dr.-Ing. Torsten Leutbecher
 - **Universität Kassel**
Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie
Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf
 - **Hochschule RheinMain**
Fachgebiet Technologie der Massivbaustoffe
und Massivbauerhaltung
Prof. Dr.-Ing. Christian Heese

Ziele

- Ermittlung von Formfaktoren zur **Klassifizierung** von UHFB und für die **Konformitätsprüfung**,
- Erfassung auch „**kleiner**“ **Prüfkörpergeometrien** (Zylinder h/d [mm] = 200/100 und Würfel a = 100 mm) wegen limitierter **Prüfmaschinenkapazitäten** in der Praxis,
- **definierte Randbedingungen** bei Herstellung, Lagerung, Vorbereitung und Prüfung, um **Reproduzierbarkeit** zu gewährleisten (Ziel: Standardabweichung ≤ 5 MPa),
- Untersuchung von **UHFB ohne Fasern** zur Vermeidung **anisotroper Effekte** aus Faserorientierung,
- Einbeziehen von NFB und HFB zur **Anknüpfung an anerkannte Regeln der Technik**.

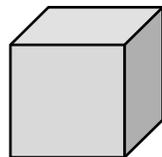
Versuchsprogramm

- **8 Serien**, davon 1 x NFB, 1 x HFB und 6 x UHFB **ohne Fasern**
- Druckfestigkeiten **$25 \text{ MPa} \leq f_{c,cyl} \leq 200 \text{ MPa}$**
- Wasser-Bindemittel-Werte **$0,75 \geq w/b \geq 0,21$**
- Größtkorndurchmesser **$d_g = 16 \text{ mm}$** (NFB, HFB)
und **$d_g = 0,5 \text{ mm} / 3 \text{ mm} / 8 \text{ mm}$** (UHFB)
- 4 Prüfkörpergeometrien, 6 Prüfkörper je Geometrie



Würfel

$a = 100 \text{ mm}$



Würfel

$a = 150 \text{ mm}$



Zylinder

$h/d \text{ [mm]} = 200/100$



Zylinder

$h/d \text{ [mm]} = 300/150$

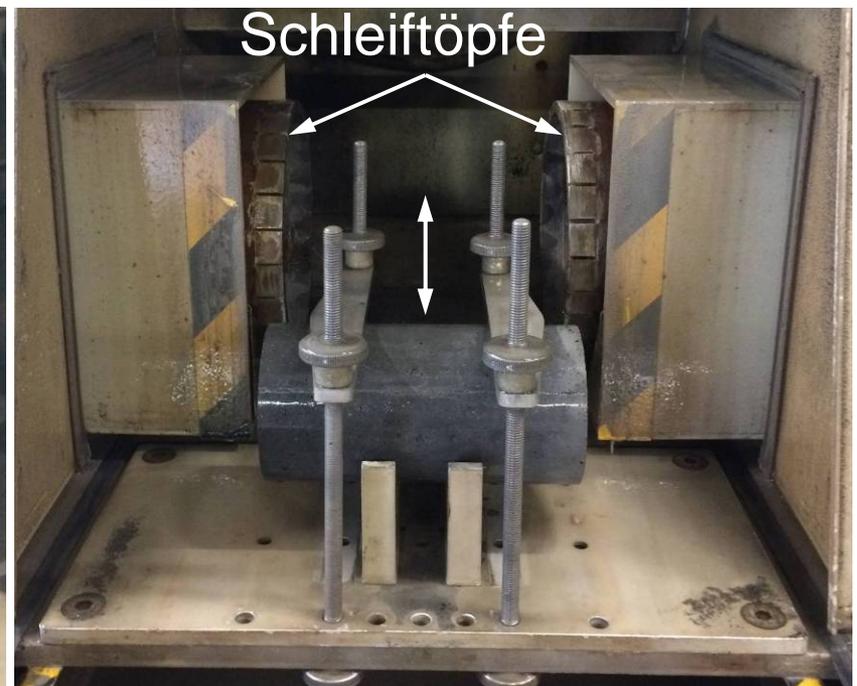
Herstellung und Lagerung

- Mischvolumen von bis zu **75 l Frischbeton**
- auf die Betonrezepturen **abgestimmte Mischregime** (Mischintensität und Mischdauer)
- **Numerierung der Schalformen** und Verwendung derselben Schalformen
- **Befüllen** der Schalformen nach **definierter Reihenfolge**
- **gleichartiges Verdichten** der Prüfkörper
- Abdecken der Prüfkörper mit **Kunststofffolie**
- Ausschalen nach 24 Stunden
- Nasslagerung bis zur Prüfung



Probenvorbereitung

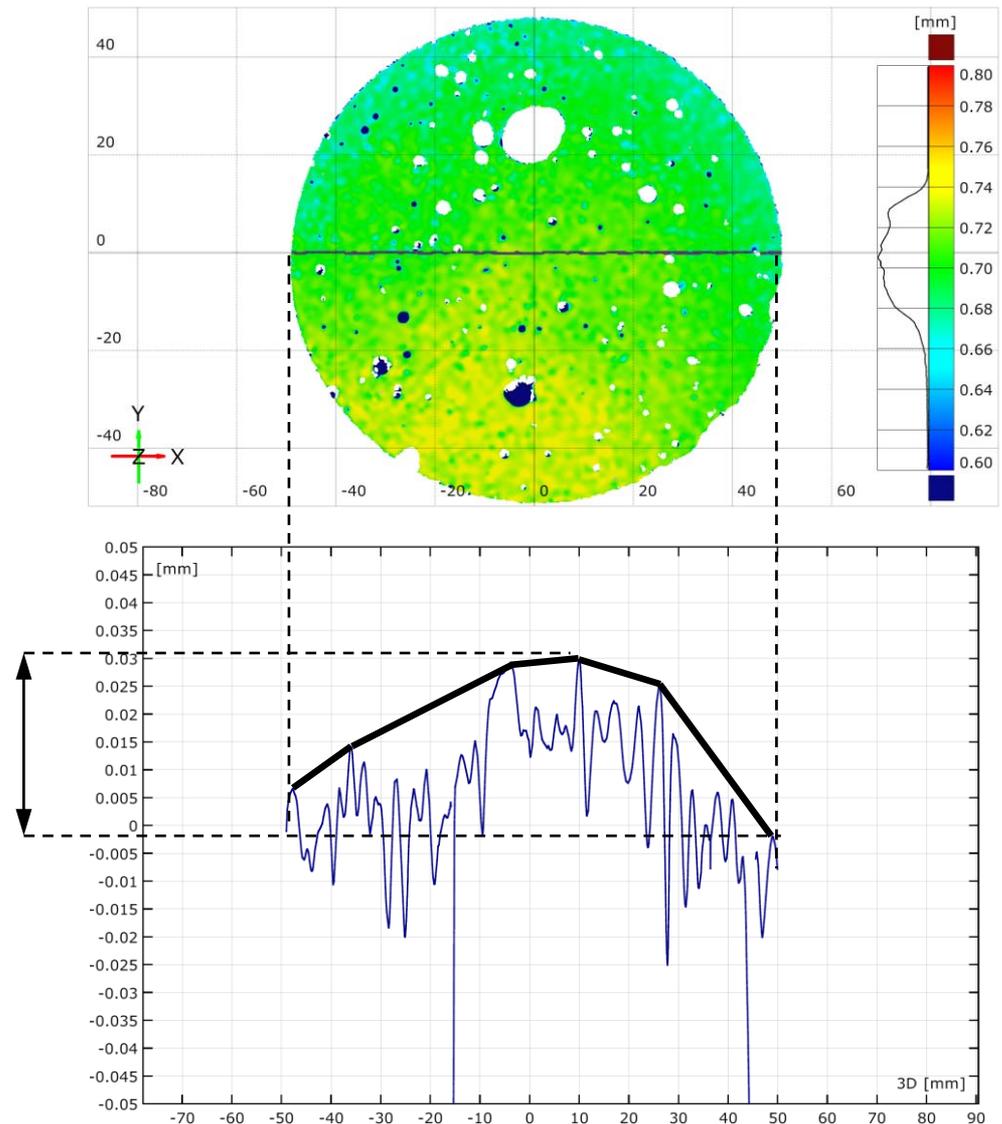
- Schleifprozess bestehend aus **vier Schleifzyklen** mit mittleren Abtragsdicken von 0,5 mm / 0,5 mm / 0,3 mm / 0,15 mm
- auch **Würfel** werden geschliffen (Minimierung der Streuung)



Prüfung der Ebenheit

- Anforderung nach **DIN EN 12390-3** ($\leq 0,1$ mm) nicht hinreichend
- "**Kippeltest**" mit bearbeiteter Stahlplatte liefert gute **qualitative Aussage**
- Messung mit **digitalem Bildkorrelationssystem (DIC)**

30 μm

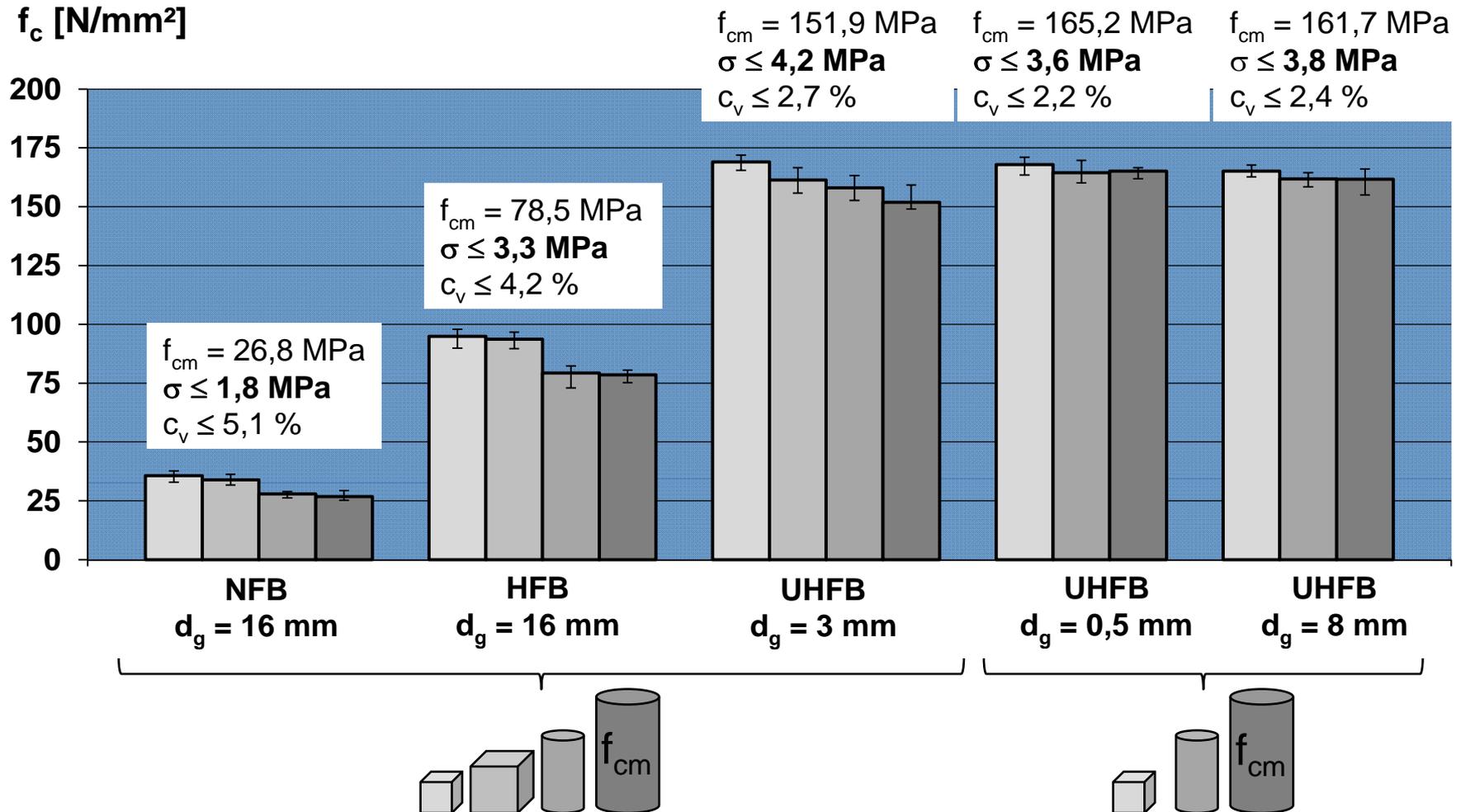


Druckfestigkeitsprüfung

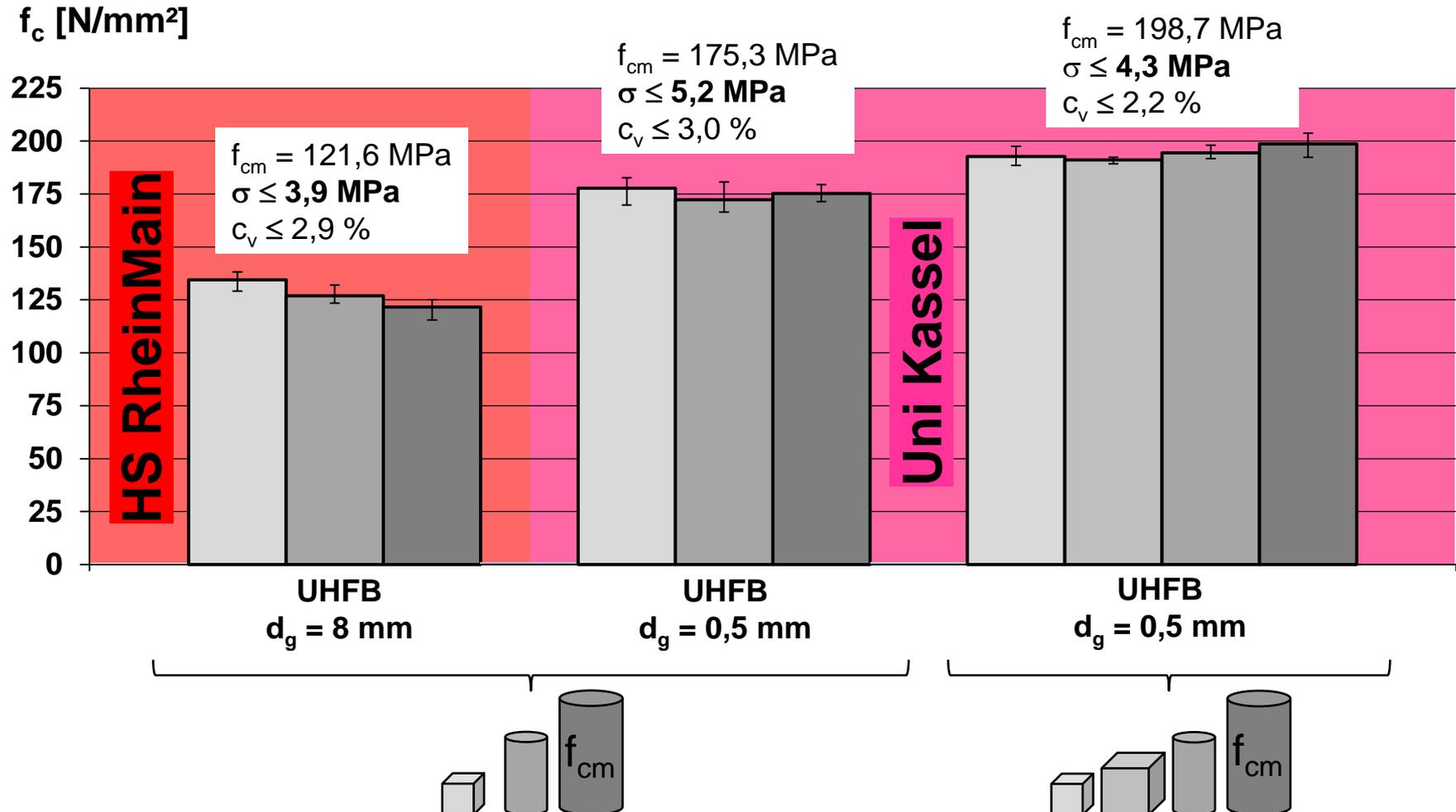
- Prüfmaschinen mit **4 MN** (Siegen, Kassel), **5 MN** (Wiesbaden) und **8 MN** (Kassel) Höchstlast
- Belastung **kraftgesteuert** mit 0,4 MPa/s



Versuchsergebnisse Uni Siegen

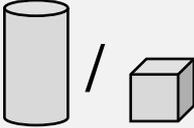
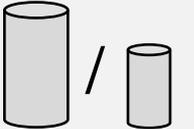


Versuchsergebnisse Uni Kassel und HS RheinMain



Übersicht Formfaktoren

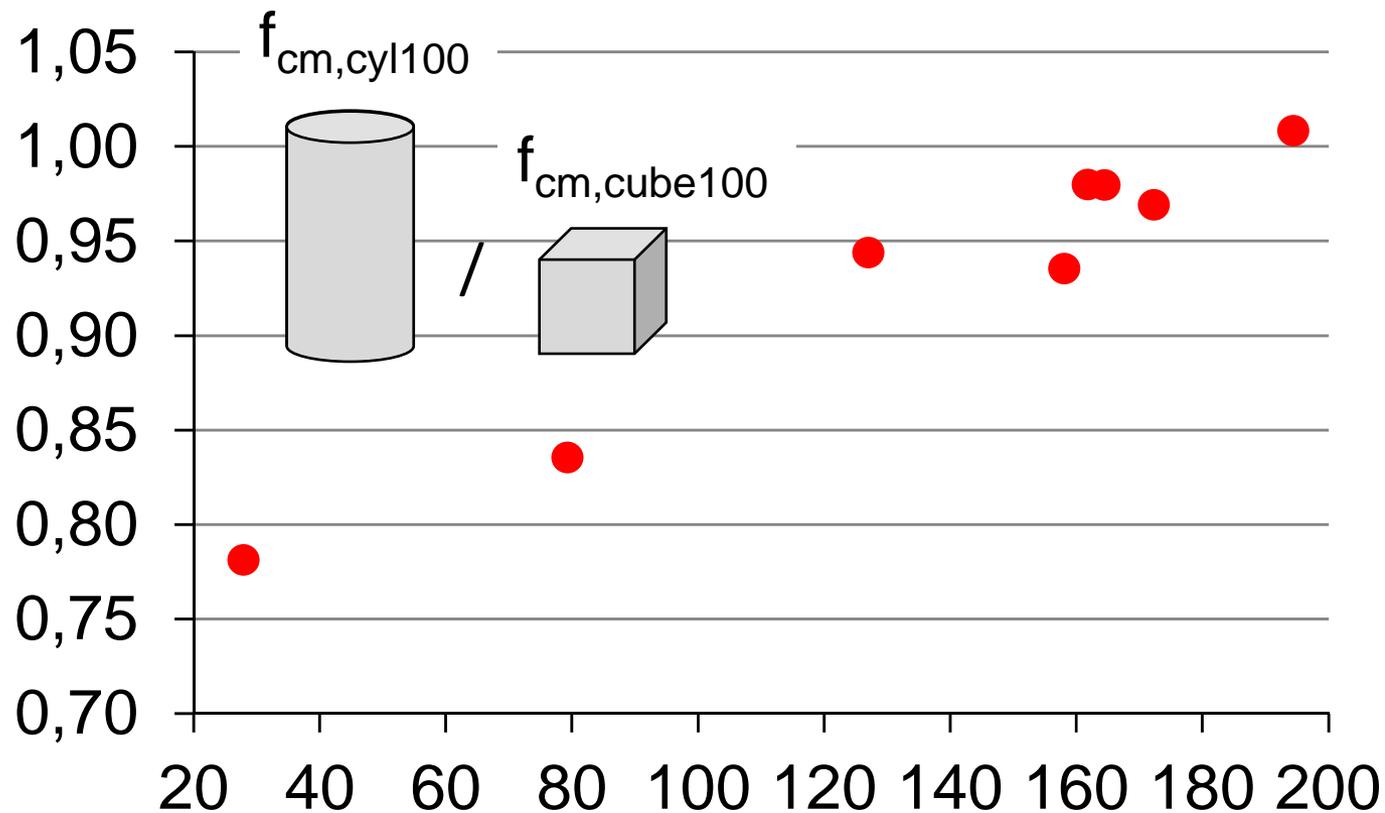
Siegen (S), Kassel (K), Wiesbaden (W)

Serie (Hochschule)	1 (S)	2 (S)	6 (W)	3 (S)	4 (S)	5 (S)	7 (K)	8 (K)
$f_{cm,cyl150}$ [MPa]	26,8	78,5	121,6	151,9	165,2	161,7	175,3	198,7
Größtkorn d_g [mm]	16	16	8	3	0,5	8	0,5	0,5
Verhältnis 	0,79	0,84	-	0,94	-	-	-	1,04
Verhältnis 	0,78	0,84	0,94	0,94	0,98	0,98	0,97	1,01
Verhältnis 	0,96	0,99	0,96	0,96	1,00	1,00	1,02	1,02
Verhältnis 	0,95	0,99	-	0,95	-	-	-	0,99

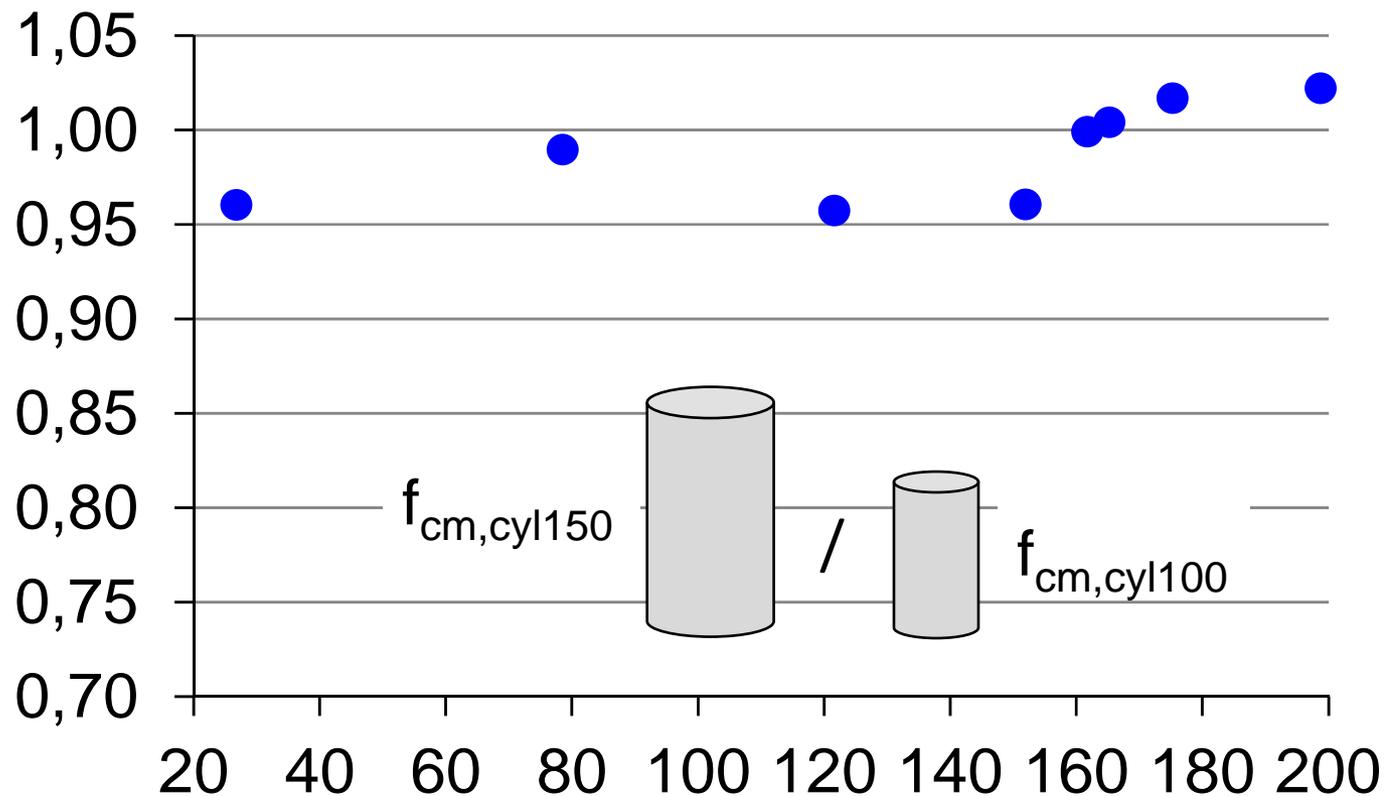
Einfluss Probenschlankheit

Einfluss Probengröße

Einfluss der Probenschlankheit für unterschiedliche Betonfestigkeiten



Einfluss der Probengröße für unterschiedliche Betonfestigkeiten



Gewonnene Erkenntnisse

- Zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse bei UHFB nur mit **sorgfältiger Probenvorbereitung** erzielbar,
→ auch **Würfel schleifen!**
- **Einfluss der Probengröße** auf die Druckfestigkeit ist – unabhängig von der Betonfestigkeitsklasse – nur **gering**,
- **Einfluss der Probenschlankheit** auf die Druckfestigkeit **nimmt** mit zunehmender Betonfestigkeitsklasse **ab**,
→ für UHFB ohne Fasern mit "**niedriger**" Druckfestigkeit (**C130**) **ca. 10 MPa** Unterschied zwischen Zylinder und Würfel,
→ für UHFB ohne Fasern mit "**hoher**" Druckfestigkeit (**C175**) praktisch **kein Unterschied** zwischen Zylinder und Würfel.

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

Fragen?

Danksagung

Das Forschungsvorhaben V 497 wurde dankenswerterweise durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) finanziell unterstützt.