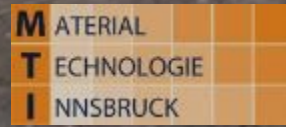


Spritzbetonrezepturen der Zukunft

im Praxistest

Rudolf Röck, Andreas Saxer

Arbeitsbereich Materialtechnologie, Universität Innsbruck



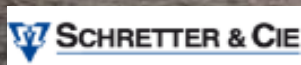
Dr. Huber

MATERIAL CONSULT

RESEARCH PROGRAM **COLLECTIVE RESEARCH**



Advanced and Sustainable Sprayed Concrete (ASSpC)



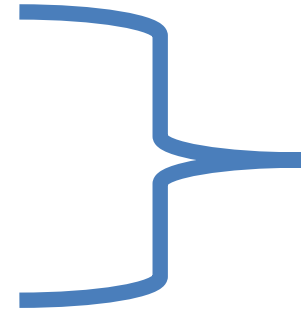
Ziele des Forschungsprogramms ASSpC

Auszug des Förderansuchens:

Die technischen Ziele liegen daher insbesondere in der Entwicklung und Bereitstellung von Spritzbetonen, welche hinsichtlich **Dauerhaftigkeit** die geplante Lebensdauer von Tiefbauten (z.B. 120-200 Jahre bei modernen Tunnelbauten) auch bei chemischem Angriff erreichen können. Diese Spritzbetone sind sowohl für Instandsetzungen als auch für Neubauten einsetzbar. Dabei sollen, im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung und des **Klimaschutzes**, Ressourcen effizient und nachhaltig eingesetzt werden.

Standard-Rezeptur des neu entwickelten Spritzbetons

- 280 kg/m³ CEM I 52,5 N
- 140 kg/m³ Premium-AHWZ
- W/B 0,47



CEMII/B-M(S,L,Q) 42,5R

- Zusammensetzung Premium-AHWZ:
 - 58 % Hüttensand gemahlen (4300 Blaine)
 - 21 % Metakaolin
 - 21 % Feinstkalzit

CEMI	67%
Hüttensand	19%
Metakaolin	7%
Feinstkalzit	7%

Gliederung

- **Vorstellung des Forschungsprojektes**
„Advanced and Sustainable Sprayed Concrete“ ASSpC
- **Ziel:** Neue Spritzbeton-Rezepturen in Form von AHWZ oder Fertig-Zement
- **Eigenschaften des neuen Bindemittels**
 - Festigkeit und Verarbeitbarkeit
 - Früh- und Endfestigkeit
 - Viskosimeter-Versuche
 - Pumpbarkeit (Mindestbindemittelgehalt)
 - Reaktionsmechanismus (Chemische Wirkungen)
 - Feinstcalcit
 - Metakaolin
 - Hüttensand (Hochofenschlacke)
 - Reaktivität (Kalkhydrat Verbrauch)

- **Dauerhaftigkeit**
 - Verarbeitbarkeit (Konsistenz, Pumpendrucke)
 - Frühfestigkeit (Junger Spritzbeton)
 - Langzeit-Festigkeit und E-Modul
 - Wasserundurchlässigkeit
 - Frostbeständigkeit
 - RV-Beständigkeit
 - Sulfat/Thaumasit-Beständigkeit
- **Praxistests**
 - SpC CEM II/B-M (Zams II)
 - SpC CEM I + AHWZ (Zams III od. Kat3)
 - SR0 + AHWZ (Erzberg)
 - Verzögererwirkung

Reaktionsmechanismen

- **Effekte von Feinstkalzit in beschleunigten Systemen**
- **Metakaolin**
 - Reaktionsprodukte-Sulfatbeständigkeit
- **Verarbeitbarkeit/Pumpbarkeit**

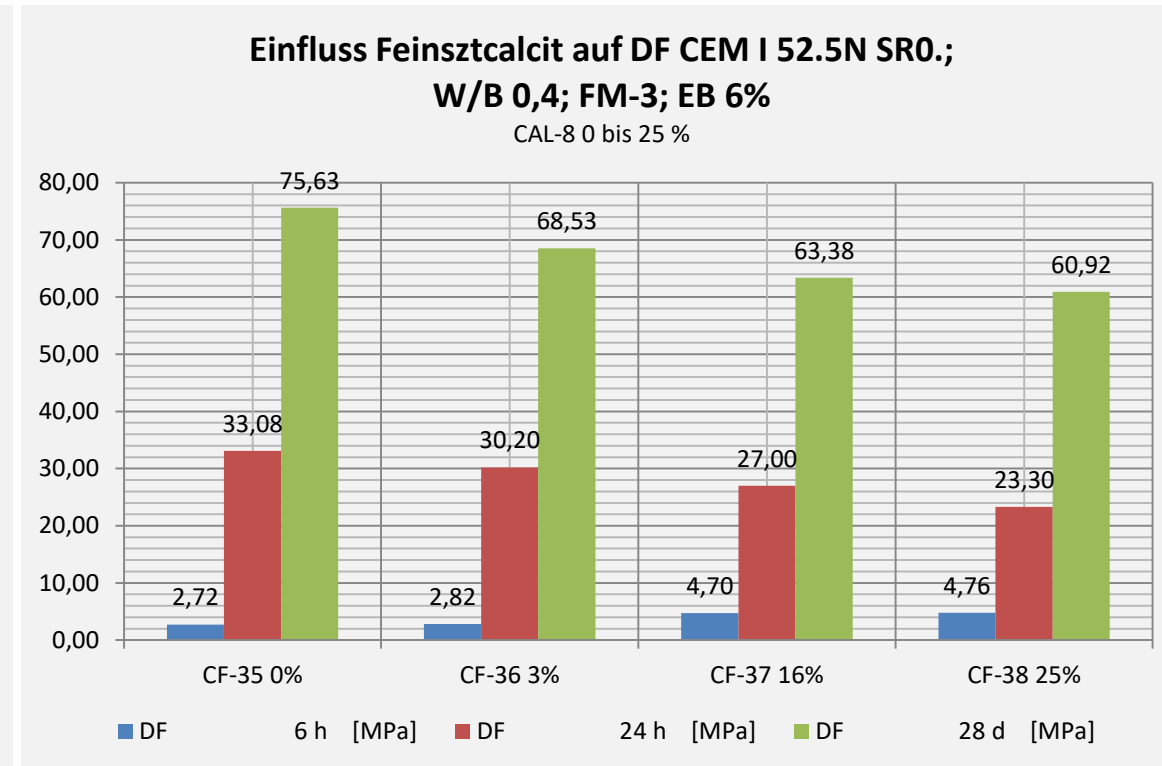
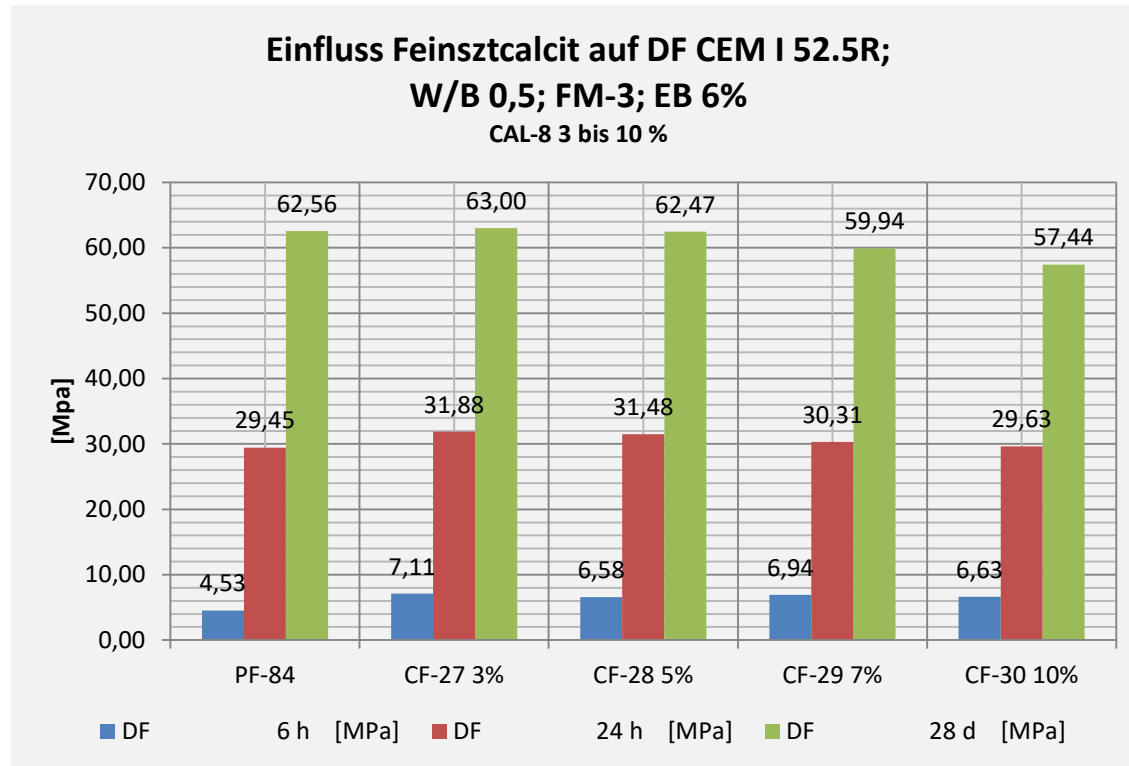
Untersuchungen zur Wirkungsweise von Feinstkalzit

- Festigkeitsentwicklung
 - Zementleimreaktion (Portlanditbildung)
 - Prismenversuche
 - MiniShot Spritzversuche (Schermodul)
 - Großspritzversuche
- (in- situ) Röntgendiffraktometrie
- Thermogravimetrie
- Rasterelektronenmikroskopie

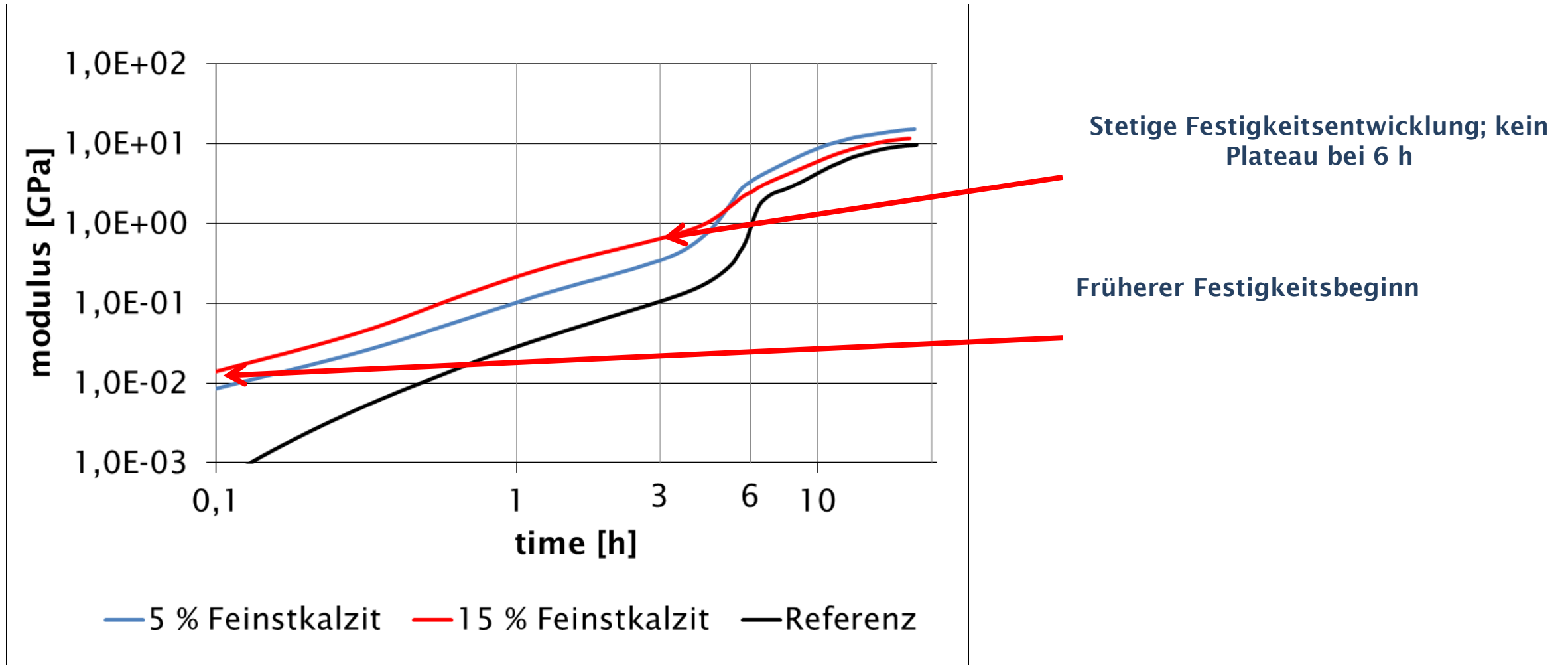


Einfluss von Feinstkalzit auf die Festigkeit

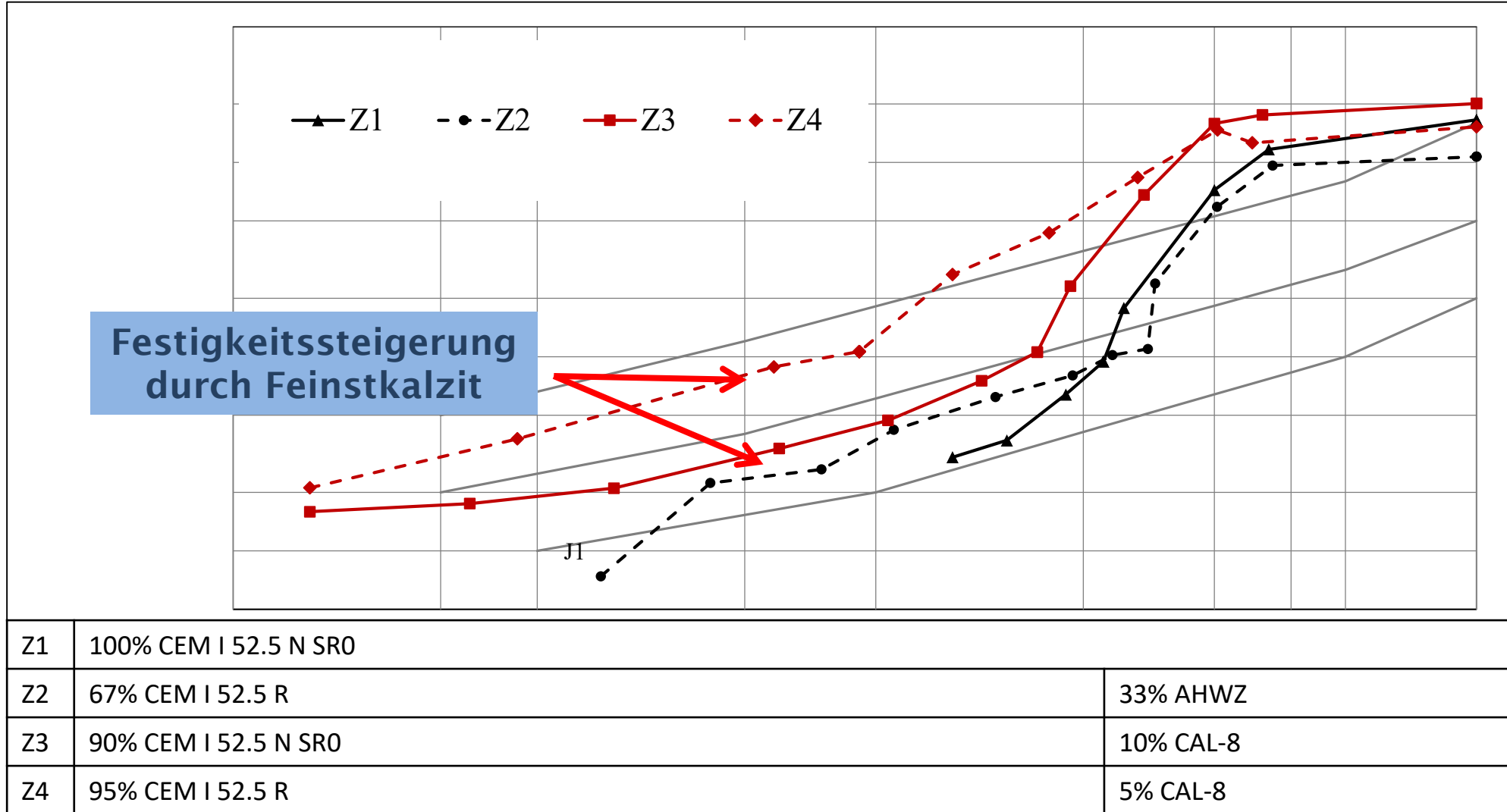
Mörtel-Prismenversuche im Labor



Einfluss von Feinstkalzit auf die Festigkeitsentwicklung beim MiniShot-Verfahren



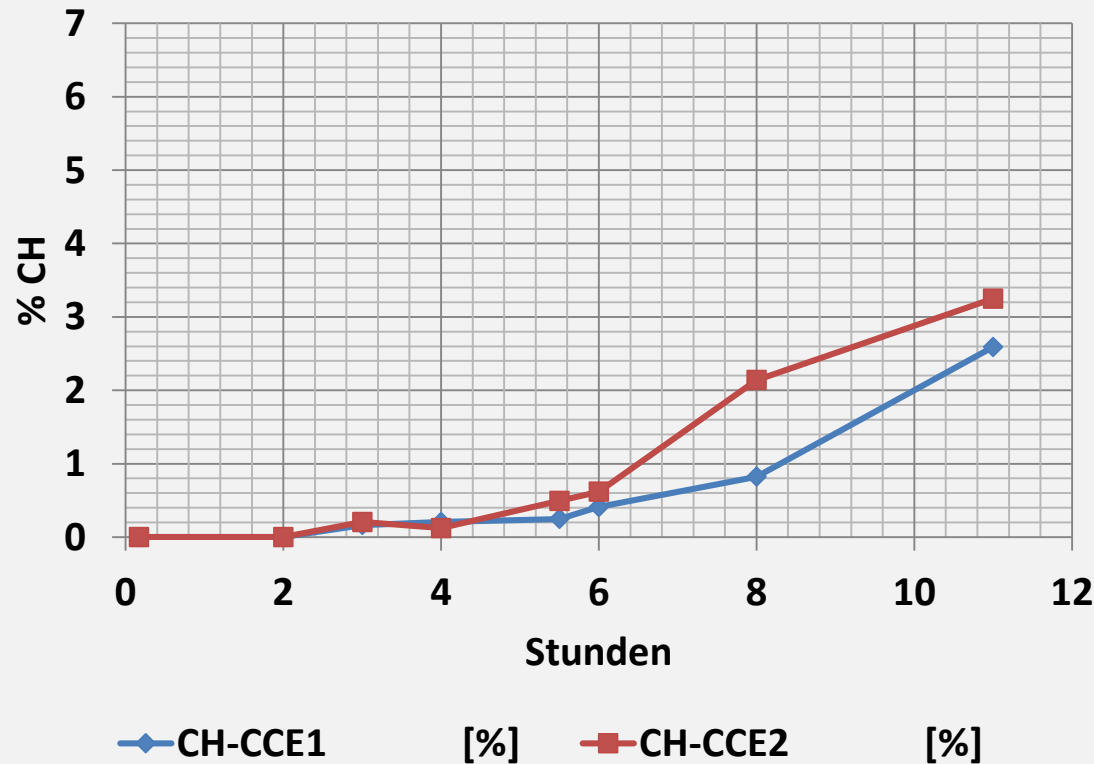
Influss von Feinstkalzit auf die Festigkeitsentwicklung im Tunnel-Großversuch



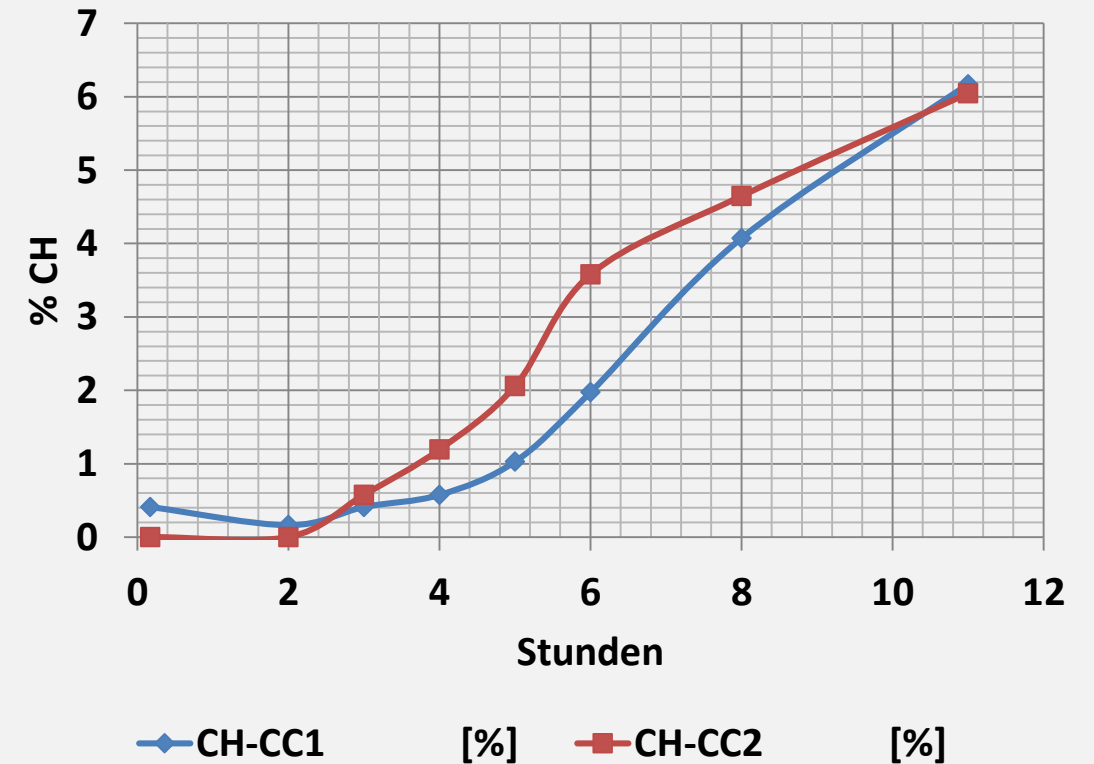
Einfluss von Feinstkalzit auf die Reaktivität (Ca(OH)_2)

Zementleimversuche mit und ohne Erstarrungsbeschleuniger ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)

Vergleich CEM I + 6% EB
mit und ohne CAL-EGU



Vergleich CEM I ohne EB
mit und ohne CAL-EGU

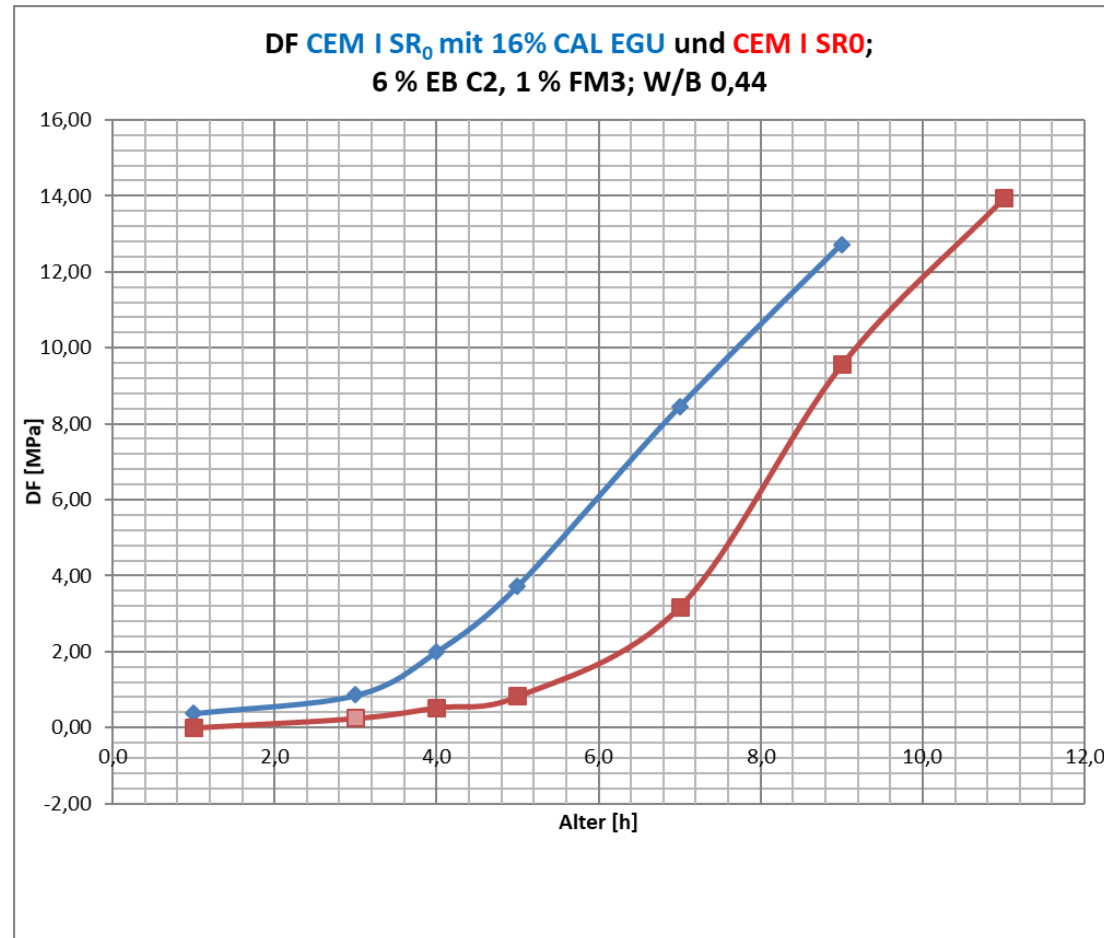


Durch Thermoanalyse ermittelter Portlandit-Gehalt bei CEM I hoch in Abhängigkeit von Feinstkalzit (FCC) und Erstarrungsbeschleuniger (EB)

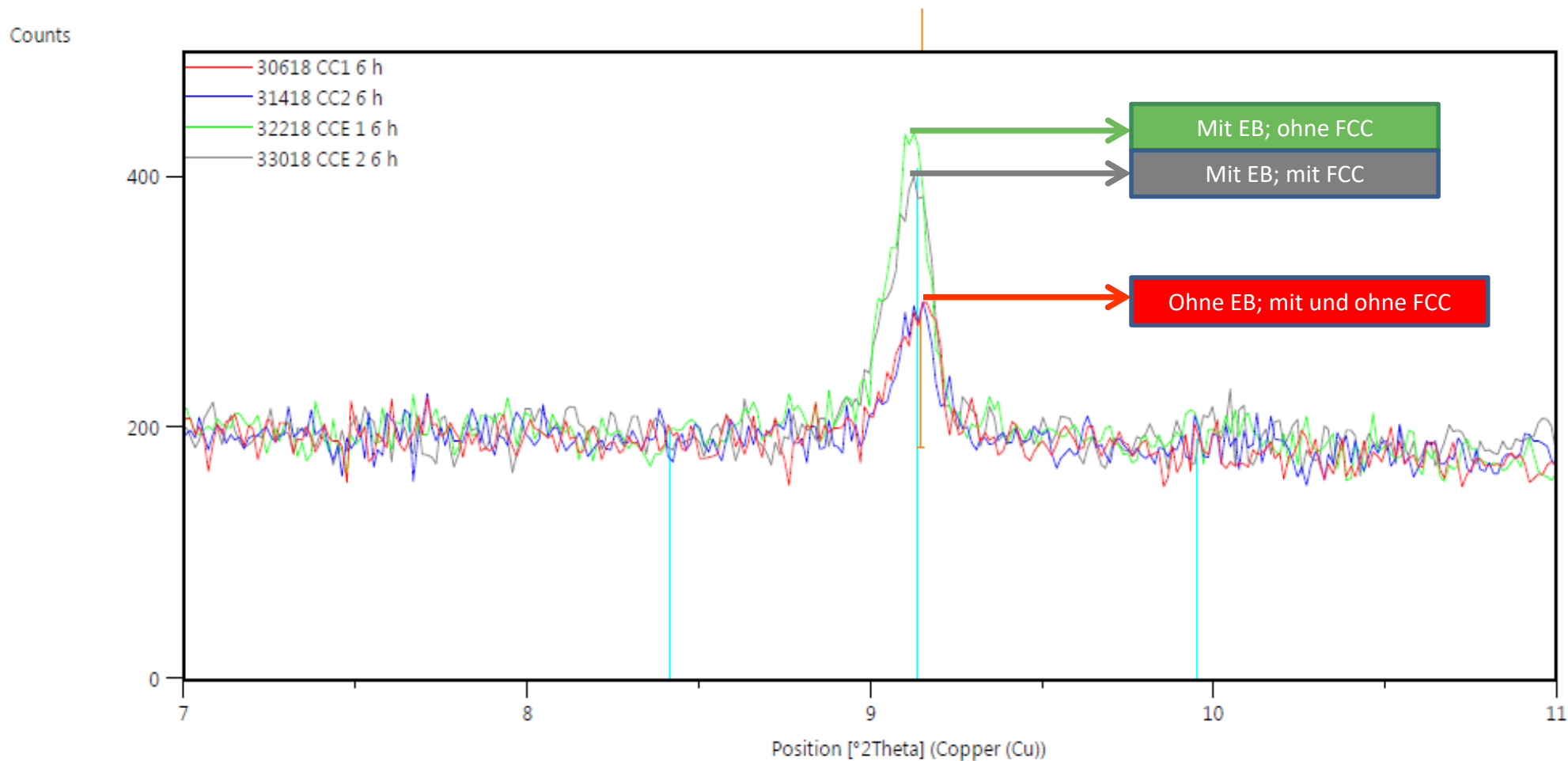
Alter [h]	mit EB ohne FCC [%]	mit EB mit FCC [%]		Alter [h]	ohne EB ohne FCC [%]	ohne EB mit FCC [%]
0.17	0.00	0.00		0.17	0.41	0.00
2.00	0.00	0.00		2.00	0.16	0.00
3.00	0.16	0.21		3.00	0.41	0.58
4.00	0.21	0.12		4.00	0.58	1.19
5.50	0.25	0.49		5.00	1.03	2.06
6.00	0.41	0.62		6.00	1.97	3.58
8.00	0.82	2.14		8.00	4.07	4.65
11.00	2.59	3.25		11.00	6.17	6.05

} 3 h

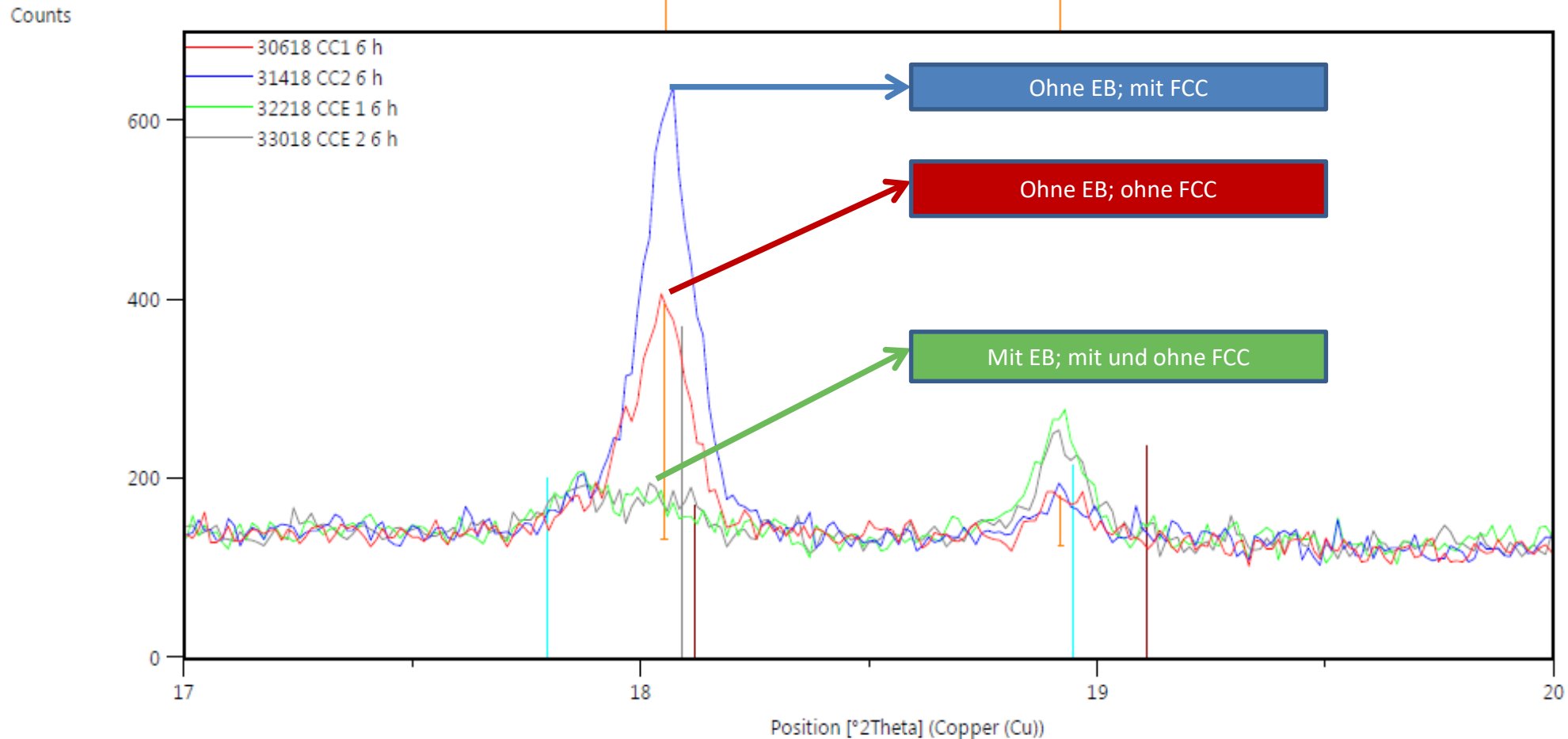
Einfluss von Feinstkalzit auf die Frühfestigkeitsentwicklung



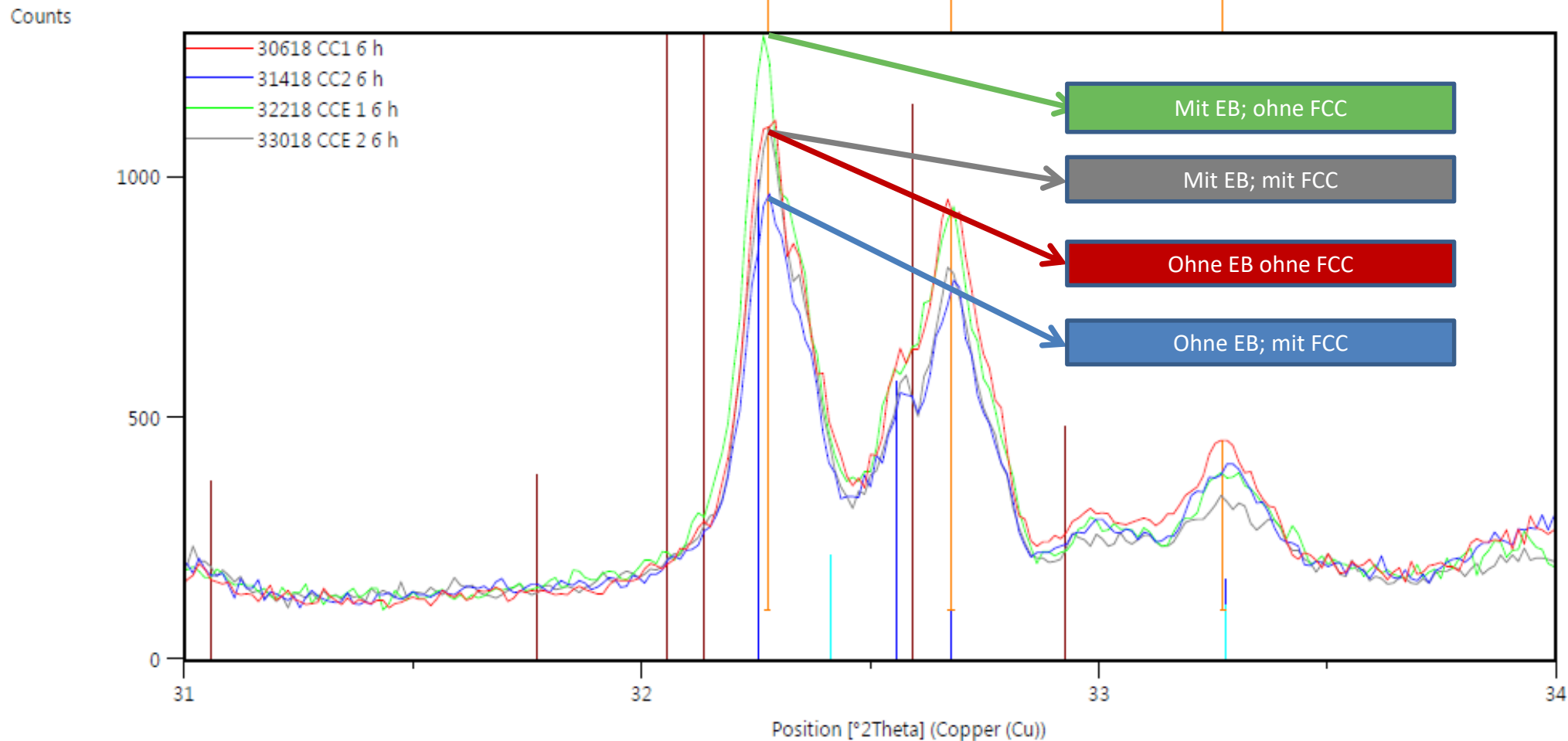
Vergleich Ettringit mit und ohne EB bzw. Feinstkalzit



Vergleich Portlandit mit und ohne EB bzw. Feinstkalzit



Vergleich Alit mit und ohne EB bzw. Feinstkalzit

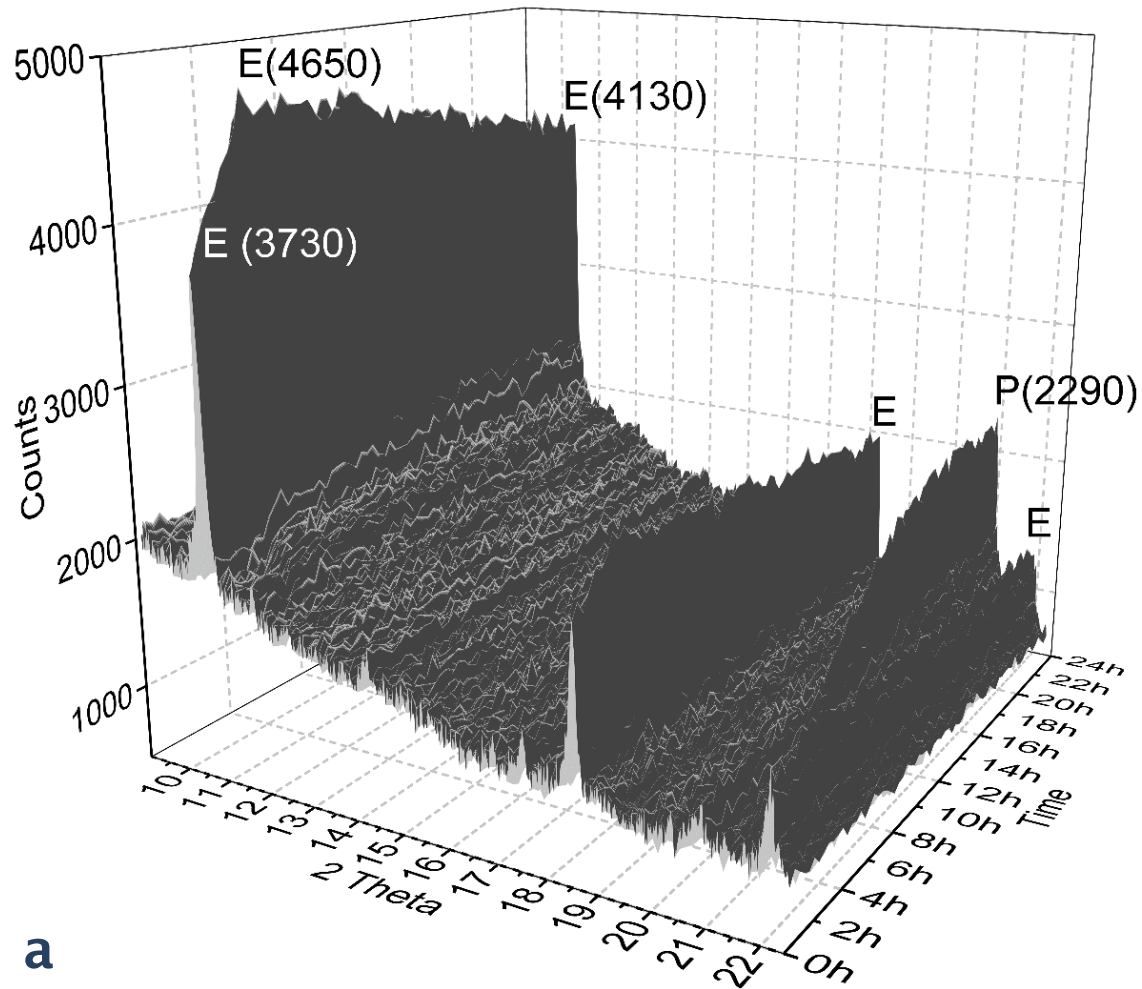


Einfluss der Erstarrungsbeschleuniger auf Portlanditbildung im Zementleim

- Erstarrungsbeschleuniger entziehen dem System Calcium- Ionen zur Bildung von Ettringit, sodass weniger (ca. 50%) freies Ca(OH)_2 übrig bleibt. Alit-Abbau und Portlanditbildung gehen jedoch Hand in Hand. D.h. die Calcium-Ionen stammen **nicht** aus dem Alit (C3S)! (Freikalk; Sulfatträger)
- Die Ettringitbildung wird durch EB annähernd verdoppelt
- Nach 6-8 h Reaktionszeit kann Feinstkalzit diesen Effekt der Portlanditbremse teilweise aufheben.
- Der Beschleuniger **verzögert** die Portlanditbildung bzw. den Alit-Verbrauch um 3 h

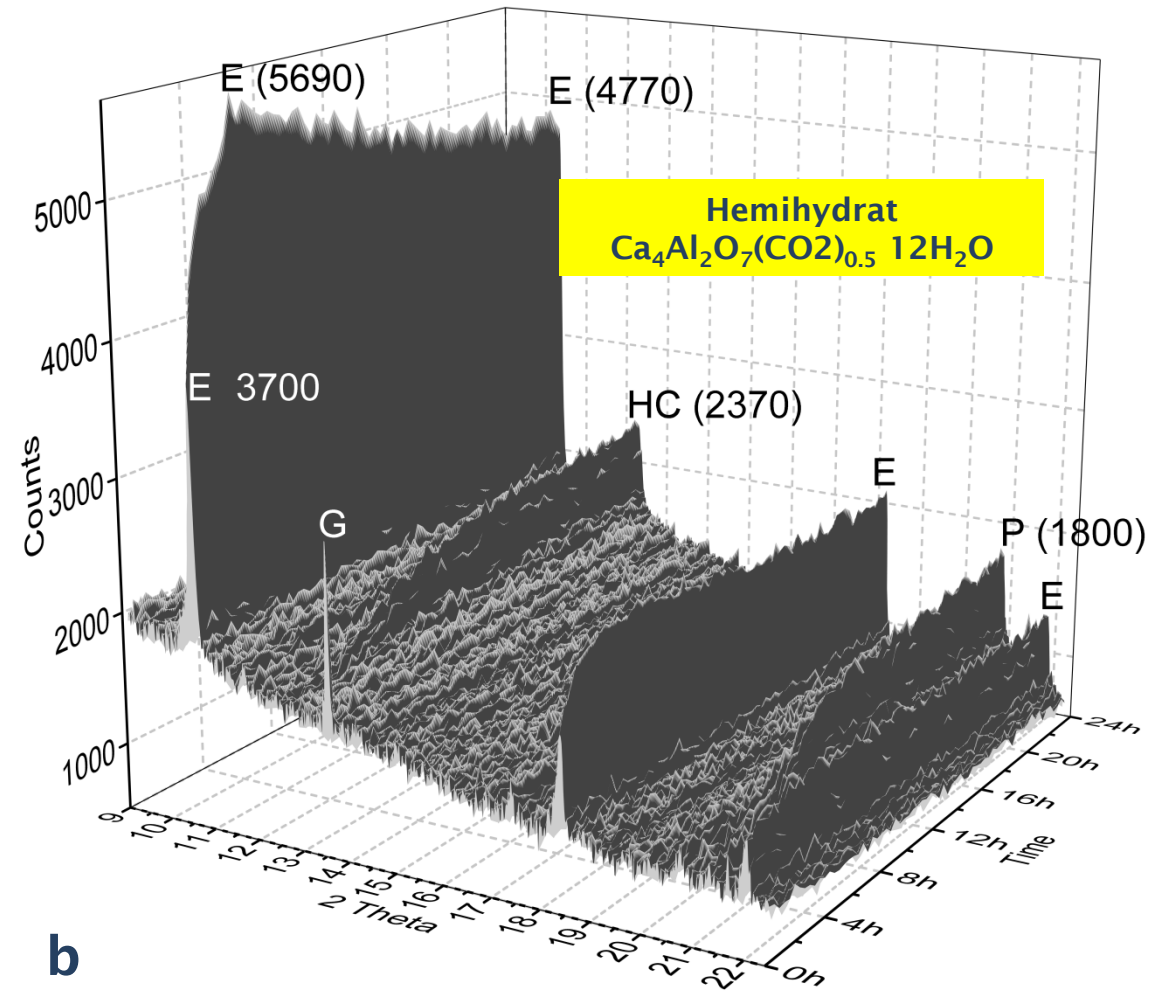
In- situ XRD ohne und mit Feinstkalzit

60% CEMI52.5R+ 40% Quarzmehl



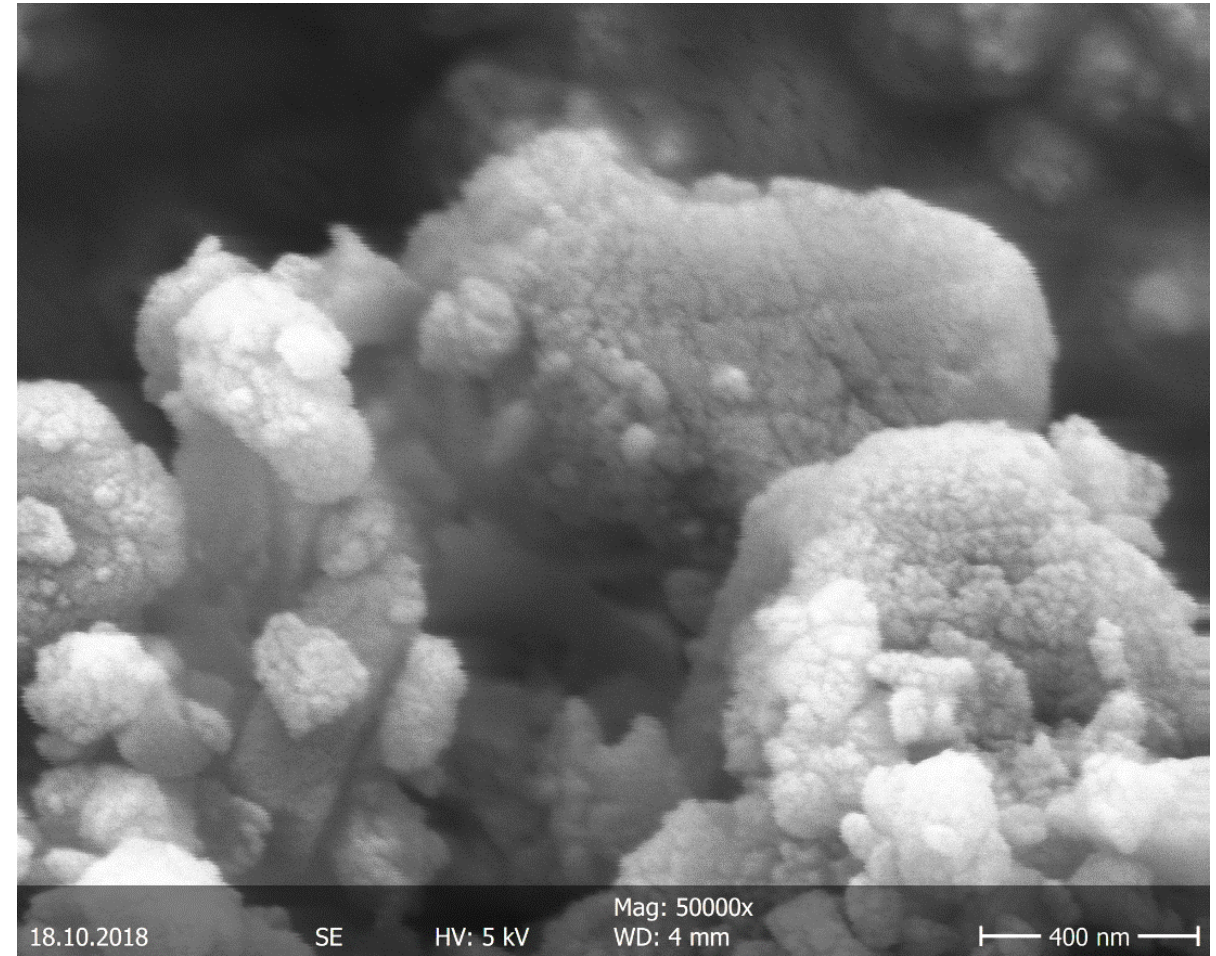
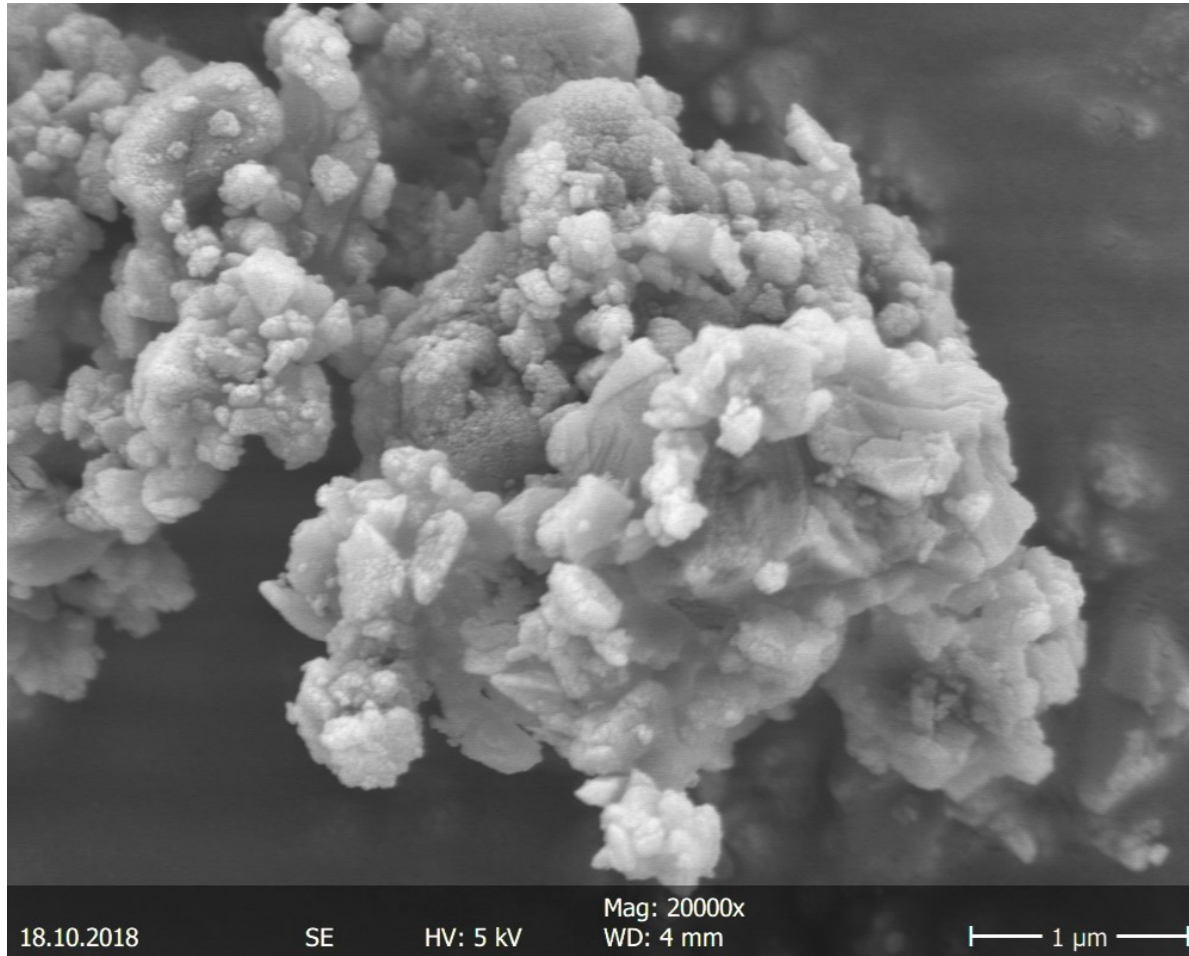
a

60% CEMI52.5R+ 15% Quarzmehl+ 25% CAL-8

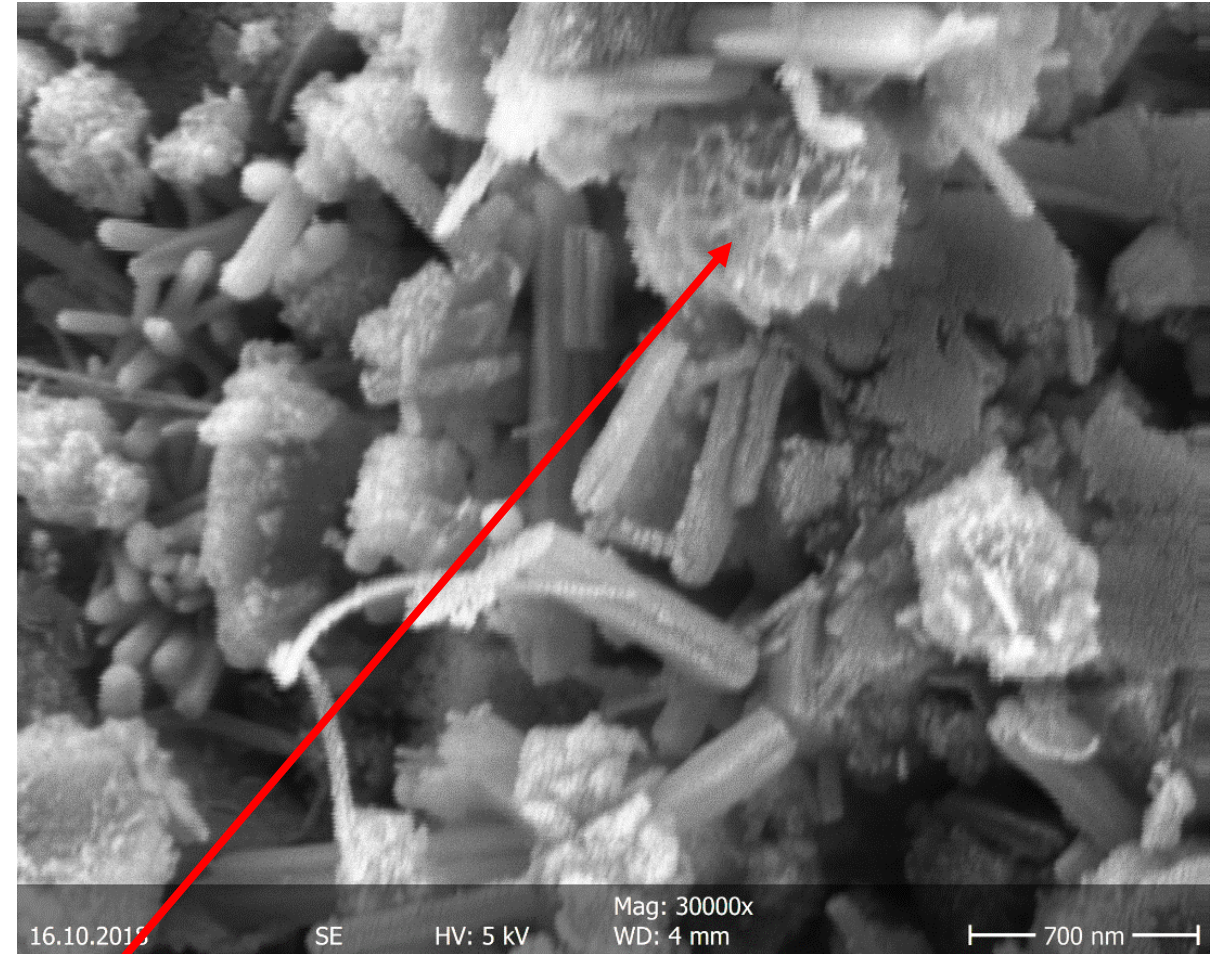
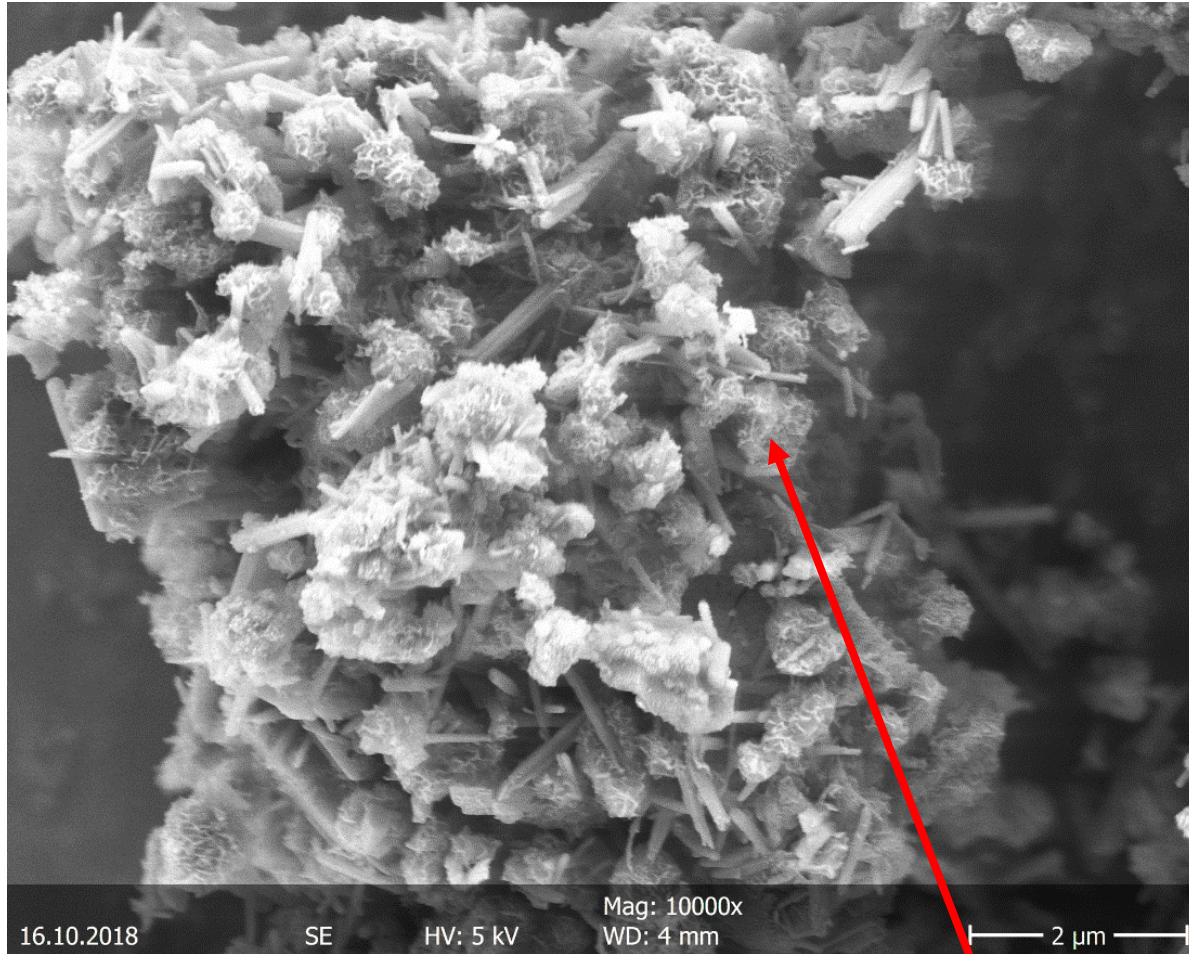


b

Feinstkalzit „unhydratisiert“



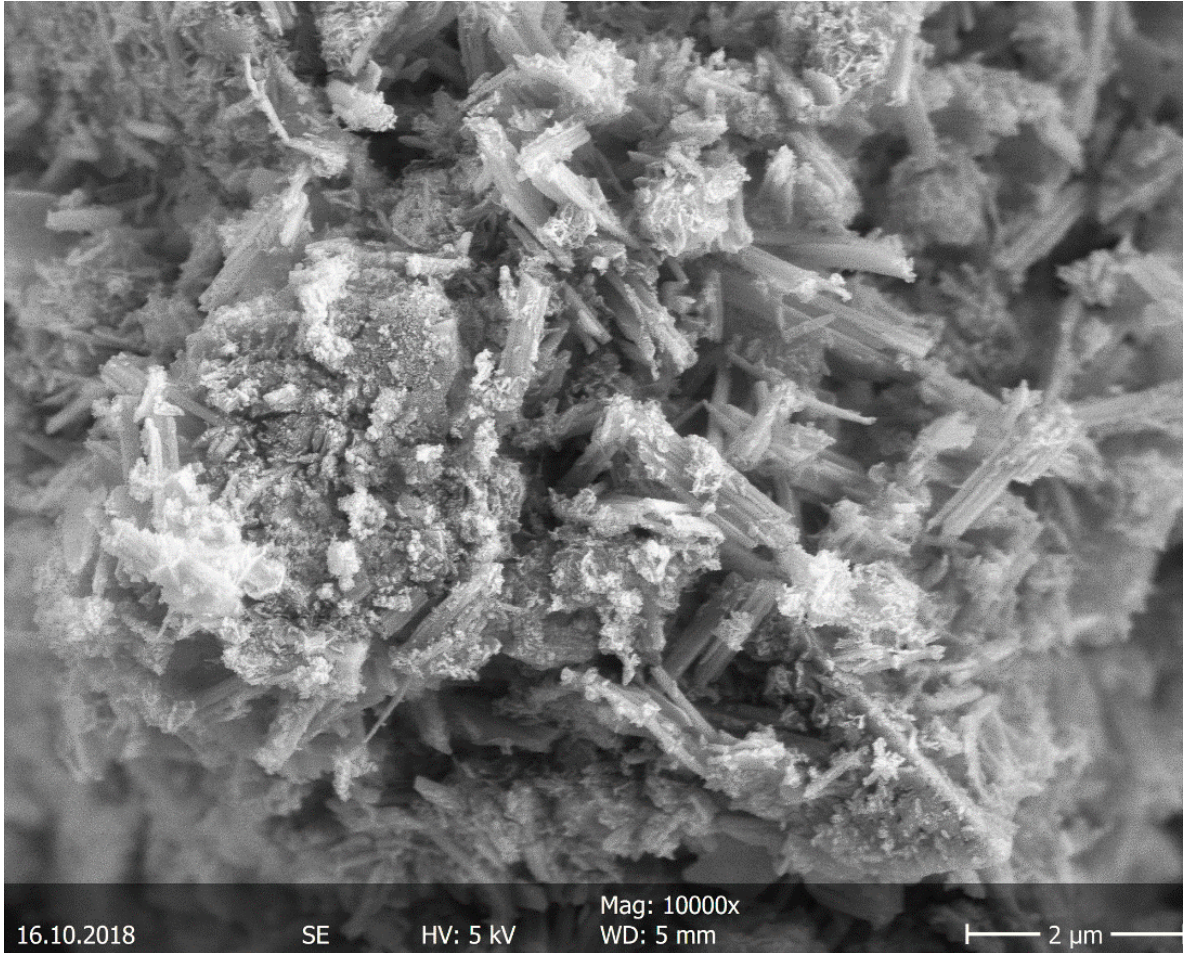
60% CEMI52.5R+ 15% Quarzmehl + 25% CAL-8
10 min



Feinstkalzit

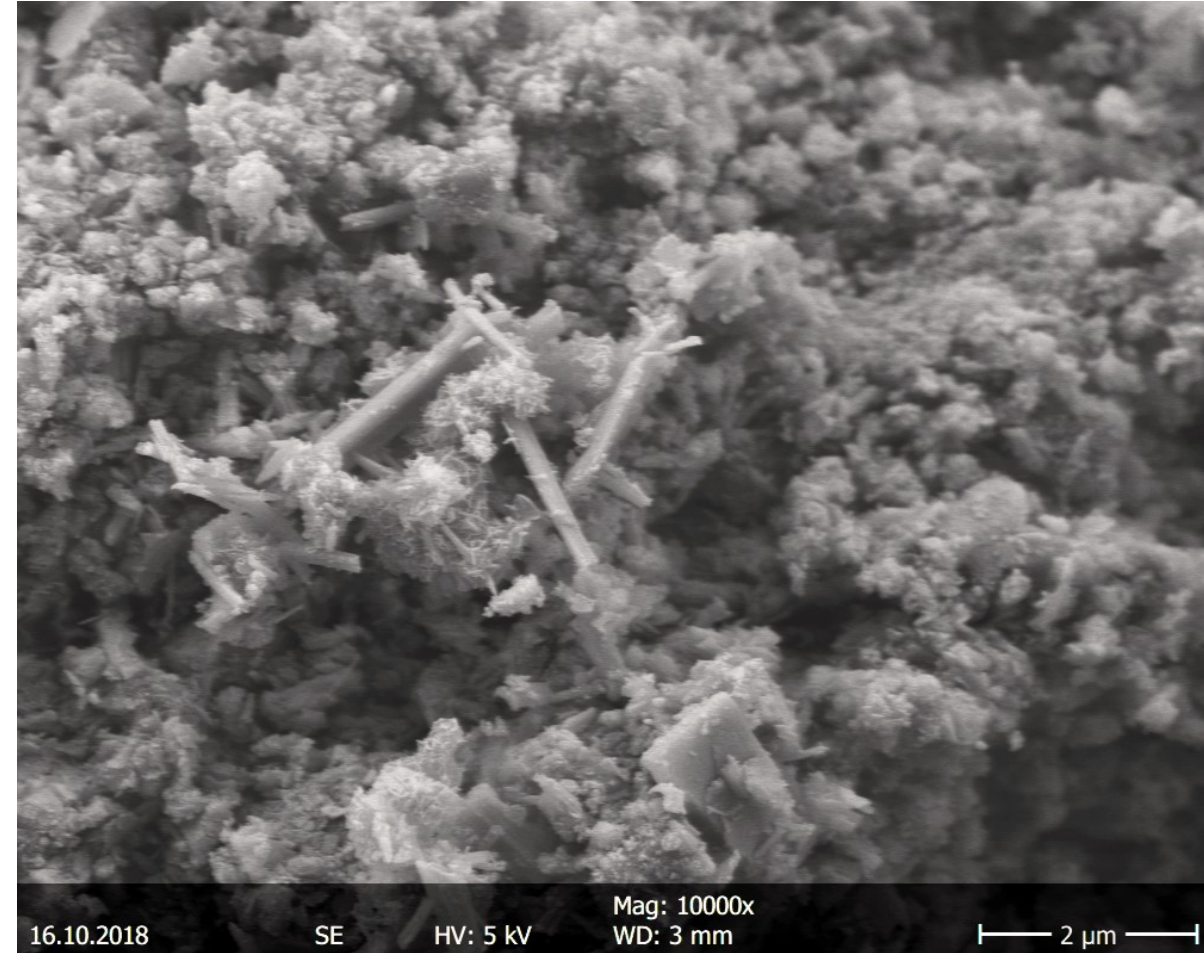
60% CEM HOCH + 40% Quarzmehl

6h



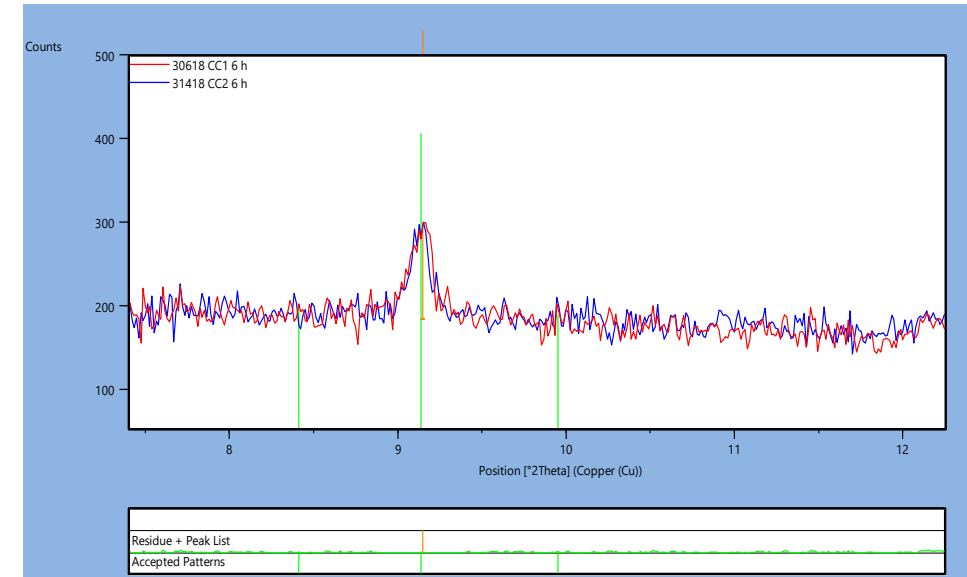
60% CEMI52.5R+ 15% Quarzmehl + 25% CAL-8

6h



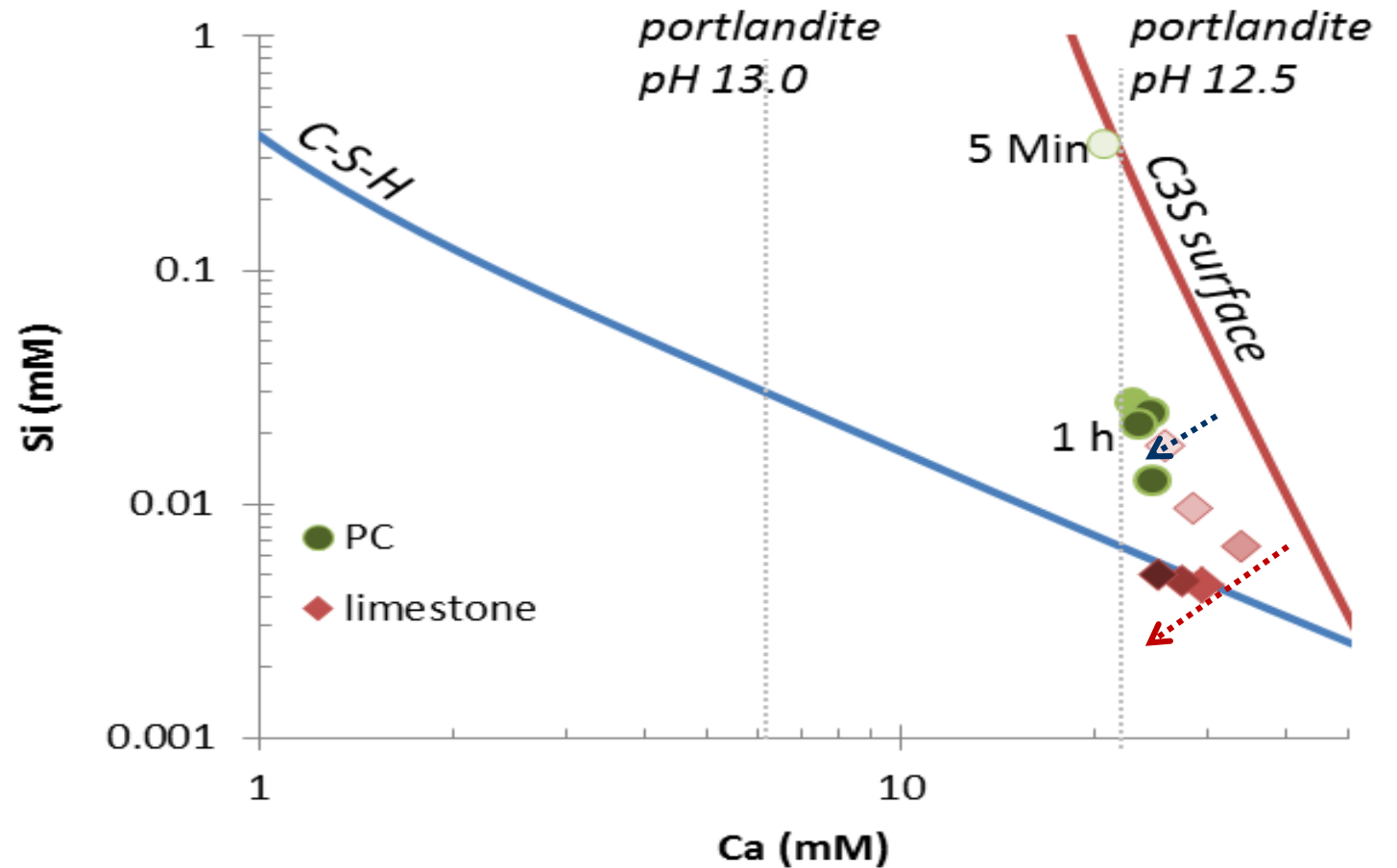
Beobachtungen

- Ettringit scheint mit Feinstkalzit weniger sichtbar zu sein, obwohl XRD-Messung keinen Unterschied zeigt
- CSH-Phasen vorwiegend auf Feinstkalzit-Partikel
- C_3S -Oberfläche eher frei von CSH
- Warum????



Effect of limestone

[Barbara Lothenbach]



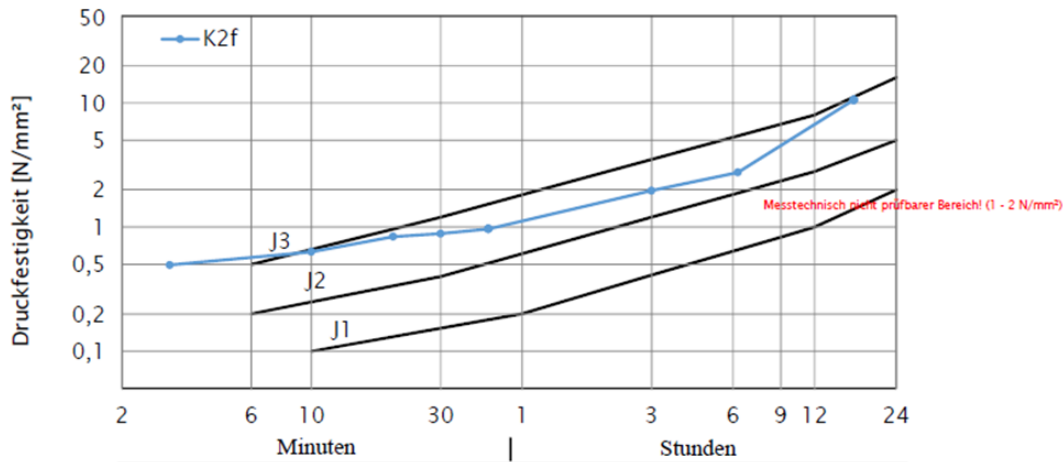
Schöler et al 2017, CCR 99

Limestone => Higher alite undersaturation => Faster dissolution

- Very strong nucleation => faster C-S-H formation
- More undersaturation => faster dissolution

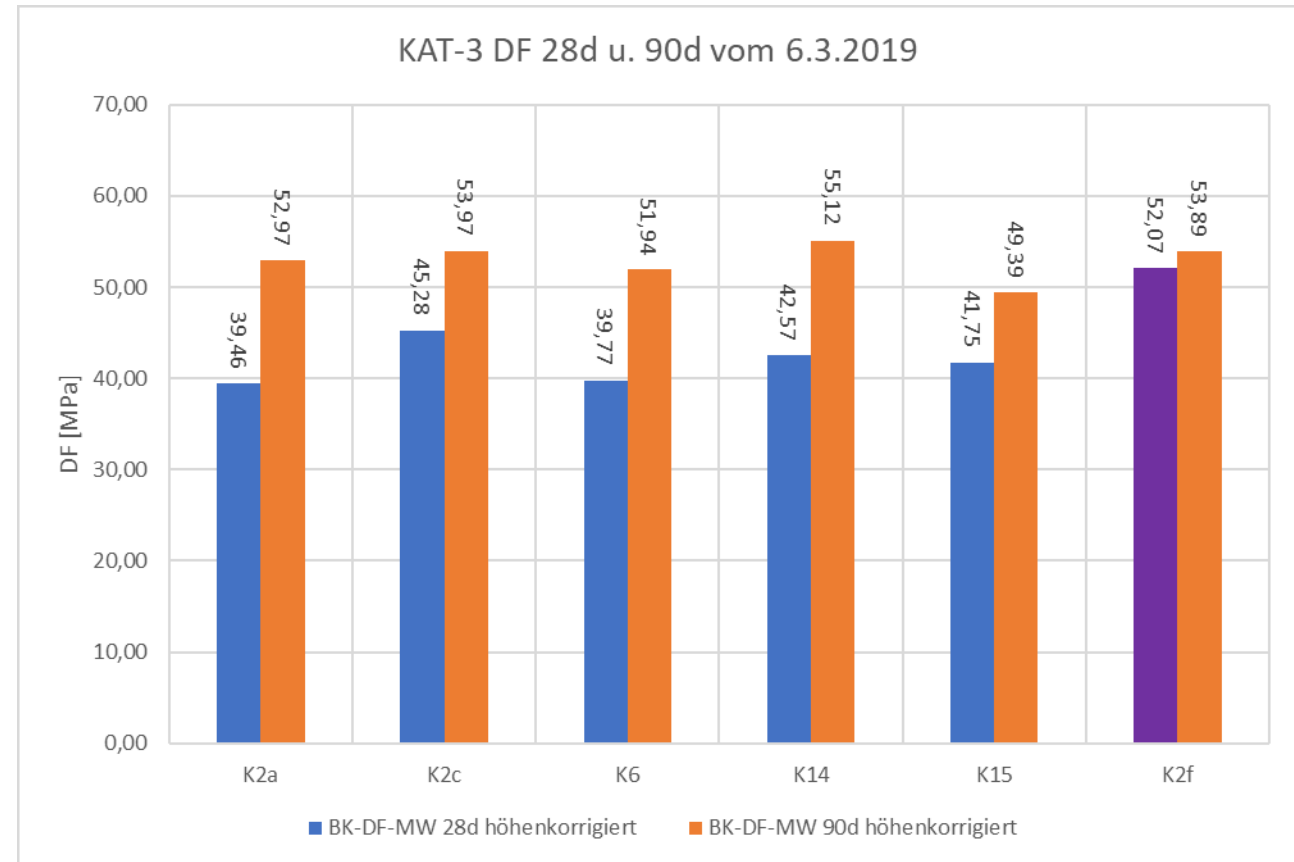
Festigkeitsentwicklung ASSpC-Spritzbeton bei KAT-3

Frühfestigkeit Spritzversuche KAT3, Tunnel km 3940-3960

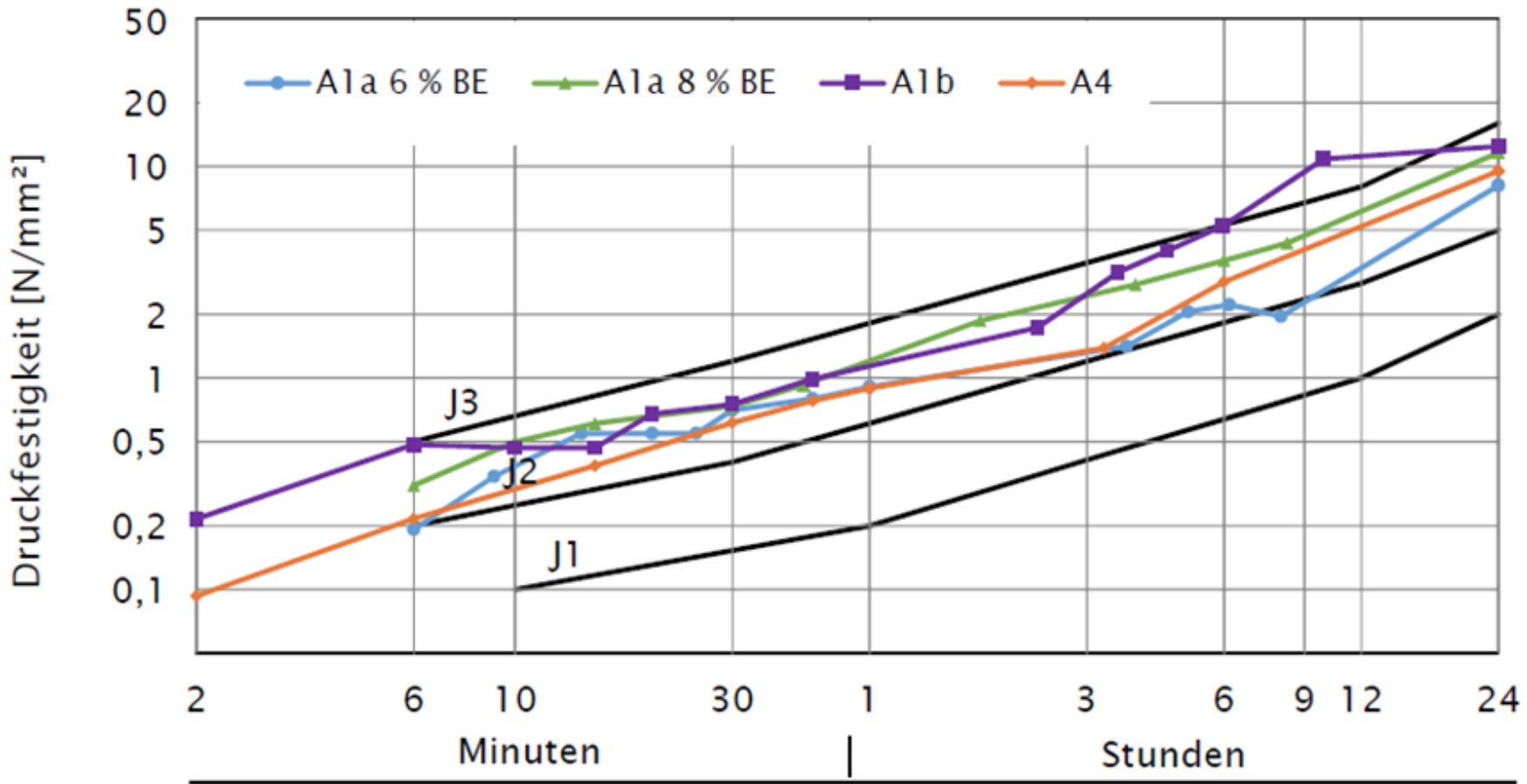


Datum: 07.03.2019
 Uhrzeit: 15:15 Uhr
 Lieferschein: 25633
 Rezeptur: Mix-P
 Beschleuniger: 7 % Mapequick 043 FFG
 Spritzleistung: 10 m³/h
 Ausbreitmaß: 65 cm
 Temp. Frischbeton: 24,5 °C

KAT-3 DF 28d u. 90d vom 6.3.2019



Zams II: Frühfestigkeit der Rezepturen A1a 6 % BE, A1a 8 % BE, A1b und A4



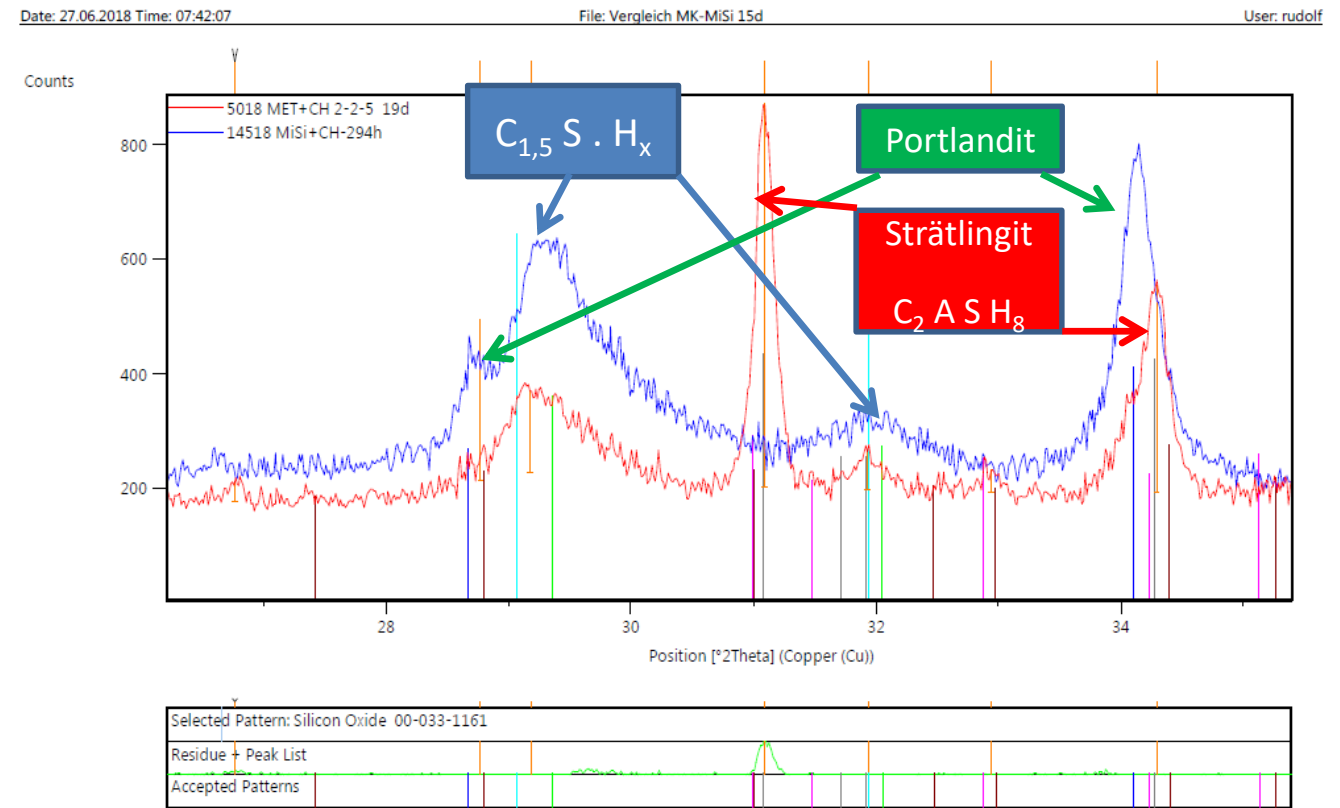
Zusammenfassung Feinstkalzit-Effekte

- CSH wächst auf der Oberfläche von Feinstkalzit, nicht auf Zementkorn.
- C_3S -Oberfläche bleibt für weitere Reaktion frei zugänglich.
- Durch Feinstkalzit ergibt sich eine Untersättigung der C_3S -Löslichkeit, die die Auflösung beschleunigt, während gleichzeitig eine Übersättigung der CSH-Löslichkeit eintritt, die zur Bildung von CSH auf der Kalzit-Oberfläche führt.

Untersuchungen zum Thema: Warum Zeigt Metakaolin eine schlechtere Sulfatbeständigkeit?

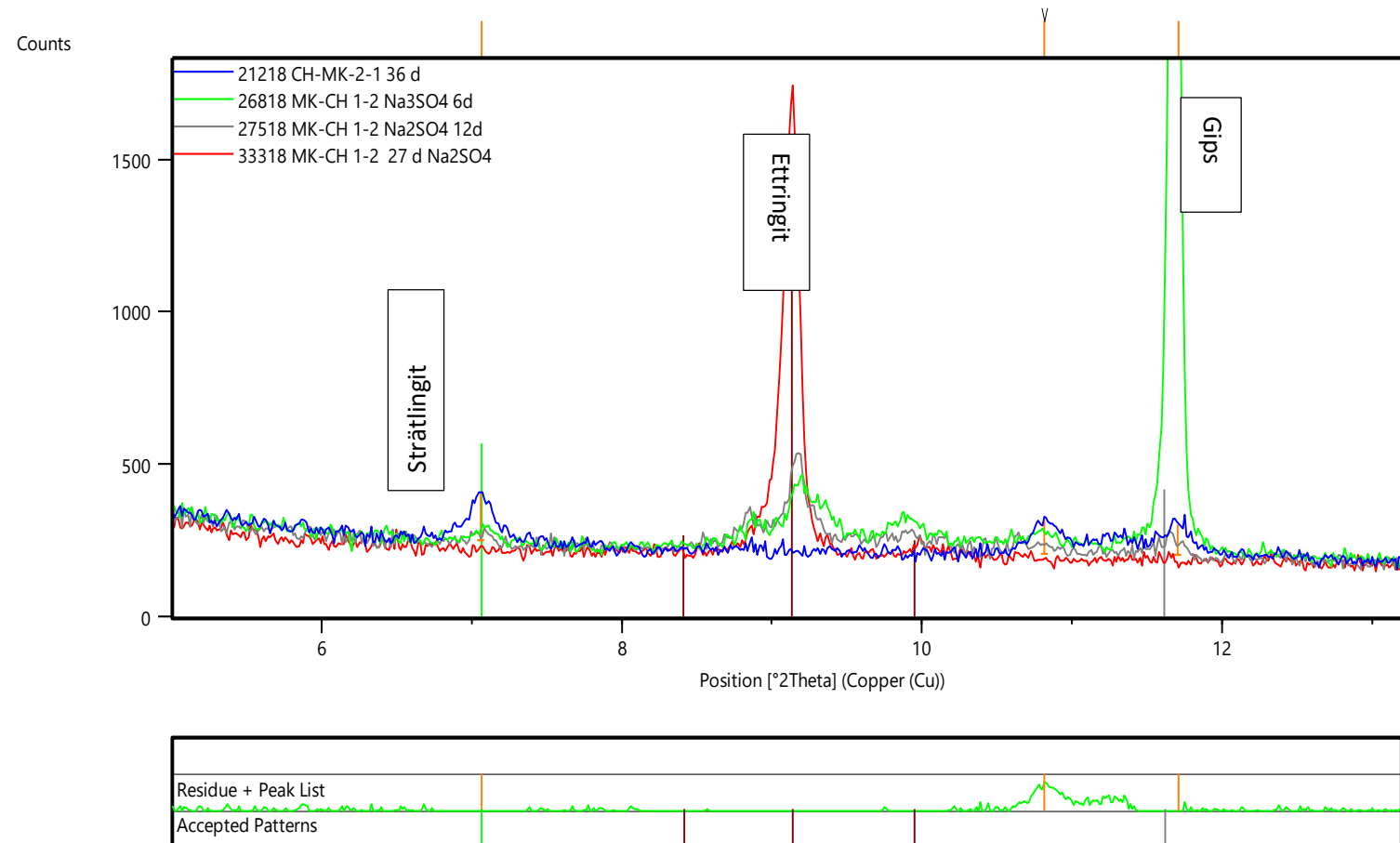
- Vergleich der Reaktion
Metakaolin/Mikrosilika mit Ca(OH)_2

- Mikrosilika+ Ca(OH)_2
CSH
- Metakaolin+ Ca(OH)_2
 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ [Strätlingit]



Wie reagiert Strätlingit bei Sulfatangriff mit Na_2SO_4 ?

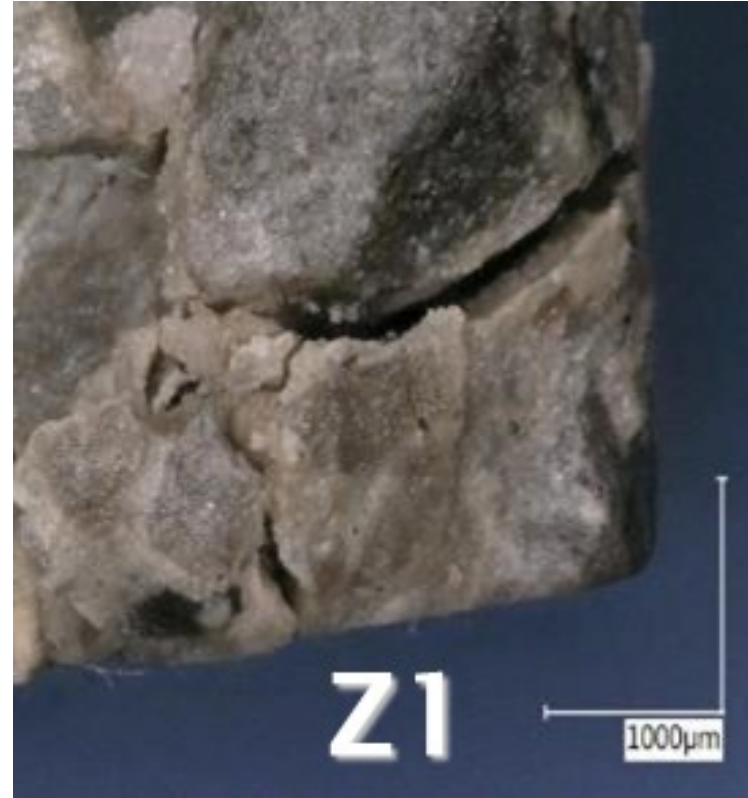
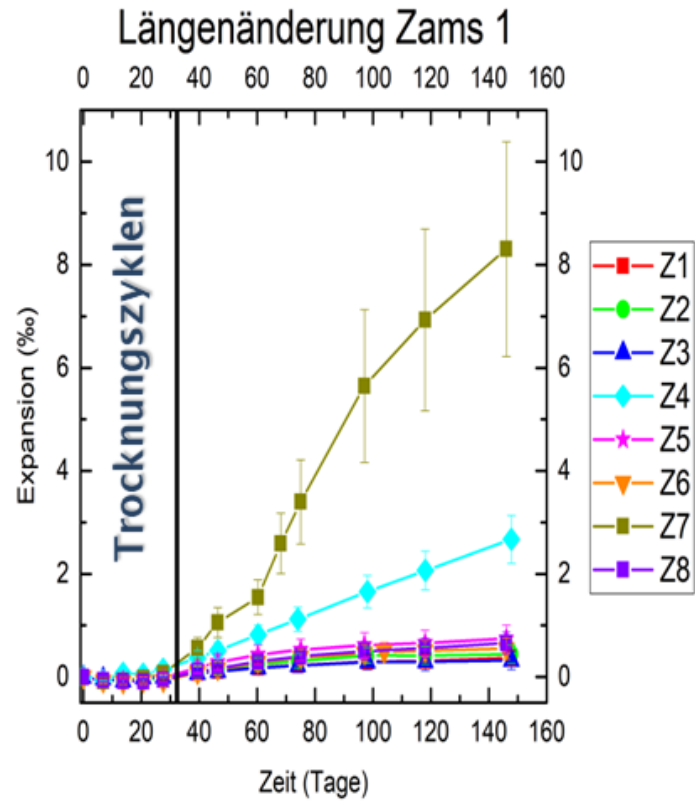
- Metakaolin+ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (1:2) 36 Tage ergibt hauptsächlich Strätlingit [$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$]
- Strätlingit für 27 Tage in 10%-iger Na_2SO_4 -Lösung



Zusammenfassung Metakaolin-Auswirkung

- Metakaolin verbraucht Portlandit, was zur Herabsetzung des RV-Wertes auf 0,3 führt.
- Der Karbonatisierungswiderstand wird dabei herabgesetzt.
- Metakaolin bildet mit Portlandit den sg. Strätlingit (C_2ASH_8), der bei Sulfatangriff mit Na_2SO_4 zunächst Gips abspaltet und sich schlussendlich in Ettringit ($C_6AS_3 \cdot H_{30}$) umwandelt.
- Bei Anwesenheit von ausreichend Hüttensand geschieht diese Reaktion nicht und die Beständigkeit ist gegeben.
- Die Sulfat/Thaumasitbeständigkeit von Mischungen mit Metakaolin und Feinstkalzit kann nur in Verbindung mit ausreichend Hüttensand gewährleistet werden.

Thaumasit-Angriff



Verarbeitbarkeit/Pumpbarkeit

Pumpe war mit Sensoren zur Druckerfassung ausgerüstet

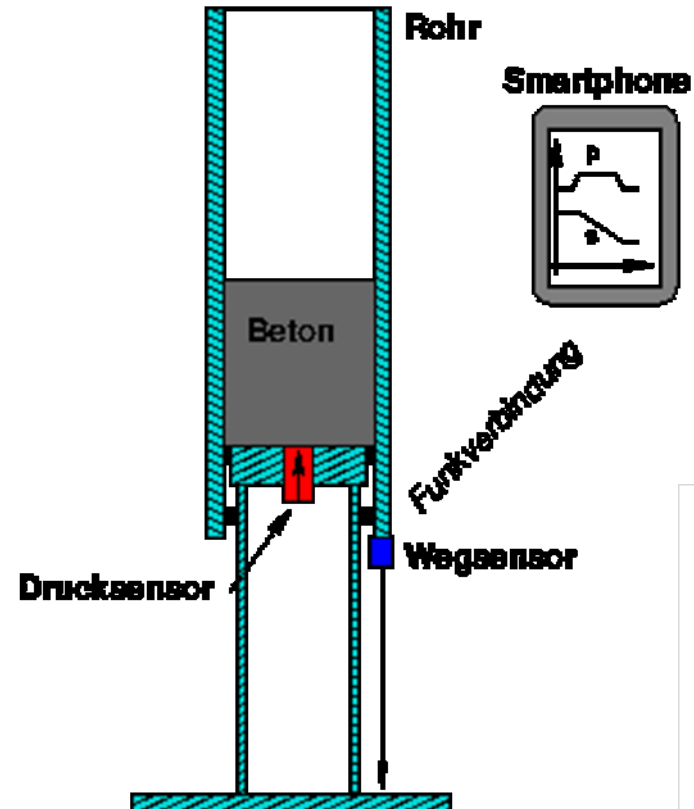


Verarbeitbarkeit/Pumpbarkeit

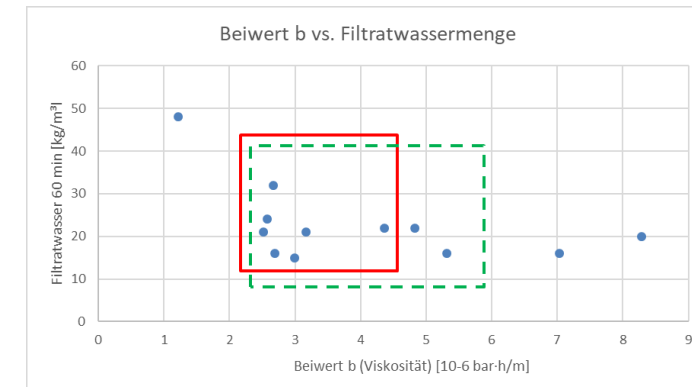
Versuch Nr.	ABM	Pumpen- druck max. [bar]	Leim- volumen ohne LP [Liter/m ³]	Leim- volumen mit LP [Liter/m ³]	Leim- volumen ohne LP und Sand <0.125 [Liter/m ³]	Beschreibung
A1a	63,5	60	409	422	340	nur Kisten gespritzt; eher weich gut zu spritzen
A2	62,0	70	397	409	334	überkopf auf Gitter
A3	56,5	200	329	416	241	nicht pumpbar ; 10 l/m ³ Wasser nachdosiert; nicht gespritzt
A4	56,0	63	392	421	335	tip-top auch bei 20 m ³ /h Leistung
A5	62,0	130	361	426	306	gerade noch pumpbar; keine RP-Messung; 12.5 l/m ³ nachdosiert
A6	67,5	57	385	472	318	ausgezeichnet
A7	42,5	66	401	433	325	keine RP-Messung
A8	64,5	63	340	382	331	mäßiges Spritzbild;
A9	65,0	49	369	435	337	zu weichmäßiges Spritzbild



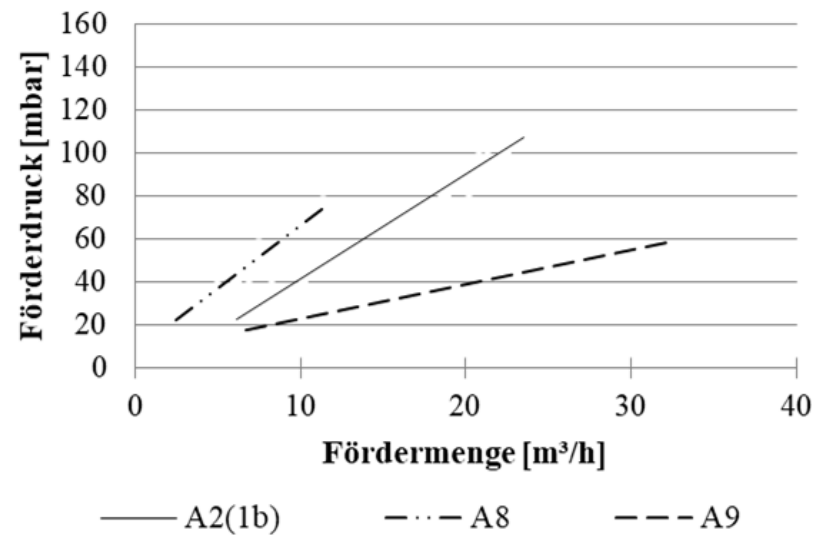
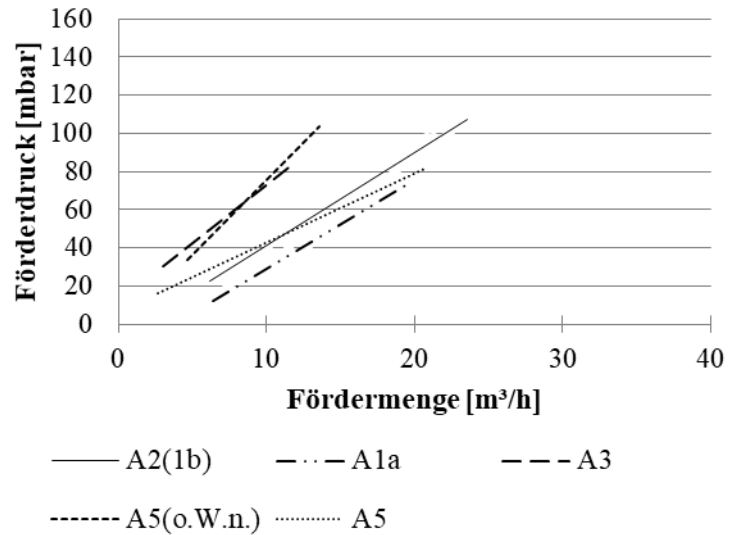
Rohrviskosimeter (Sliper)



Filterpresse

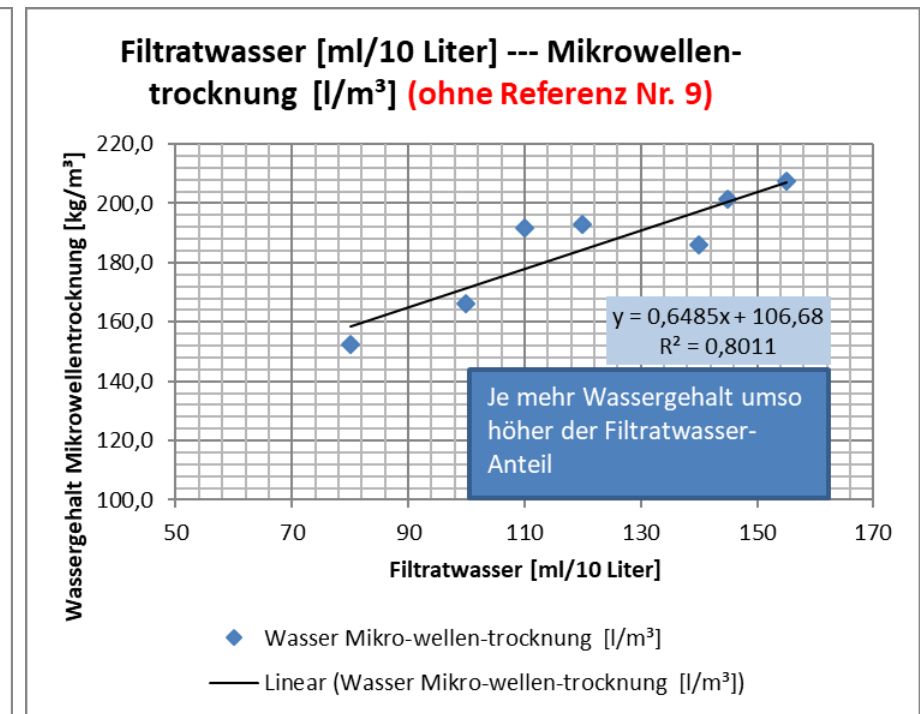
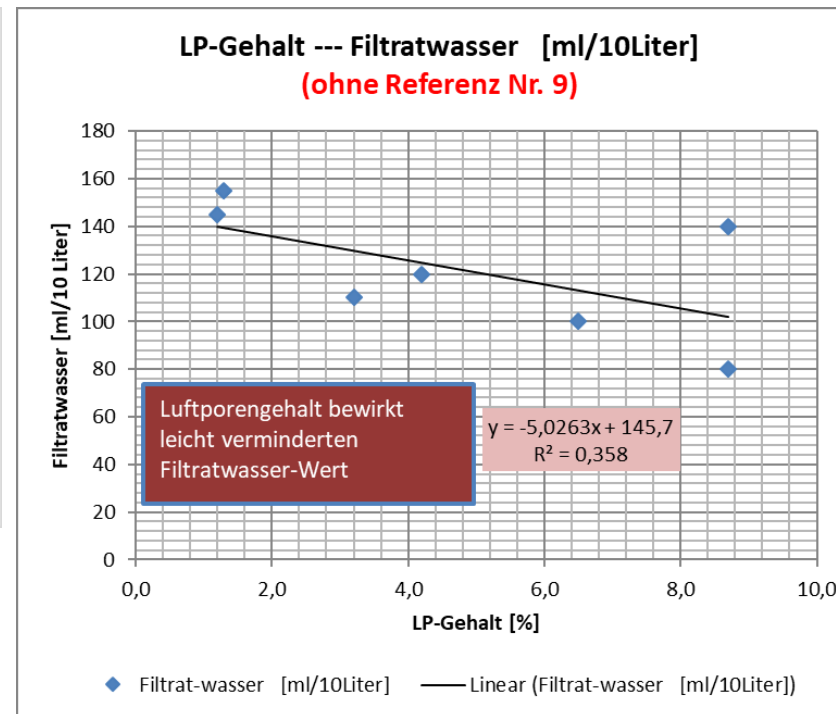
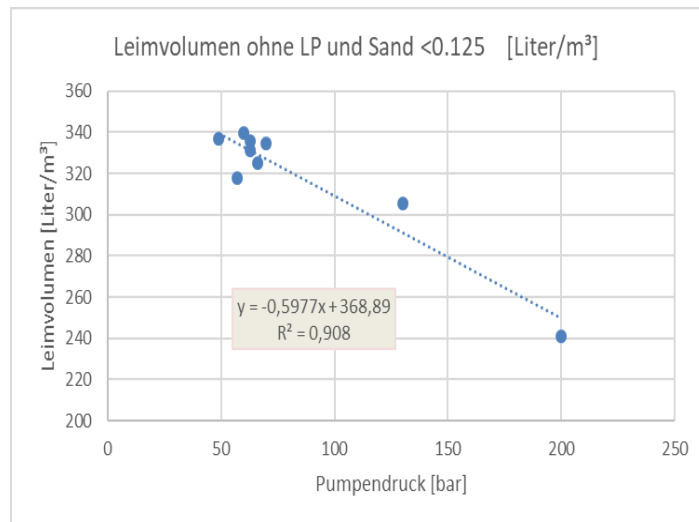


Rohr-Viskosimeter-Messungen (Sliper) zur Beurteilung der Pumpbarkeit

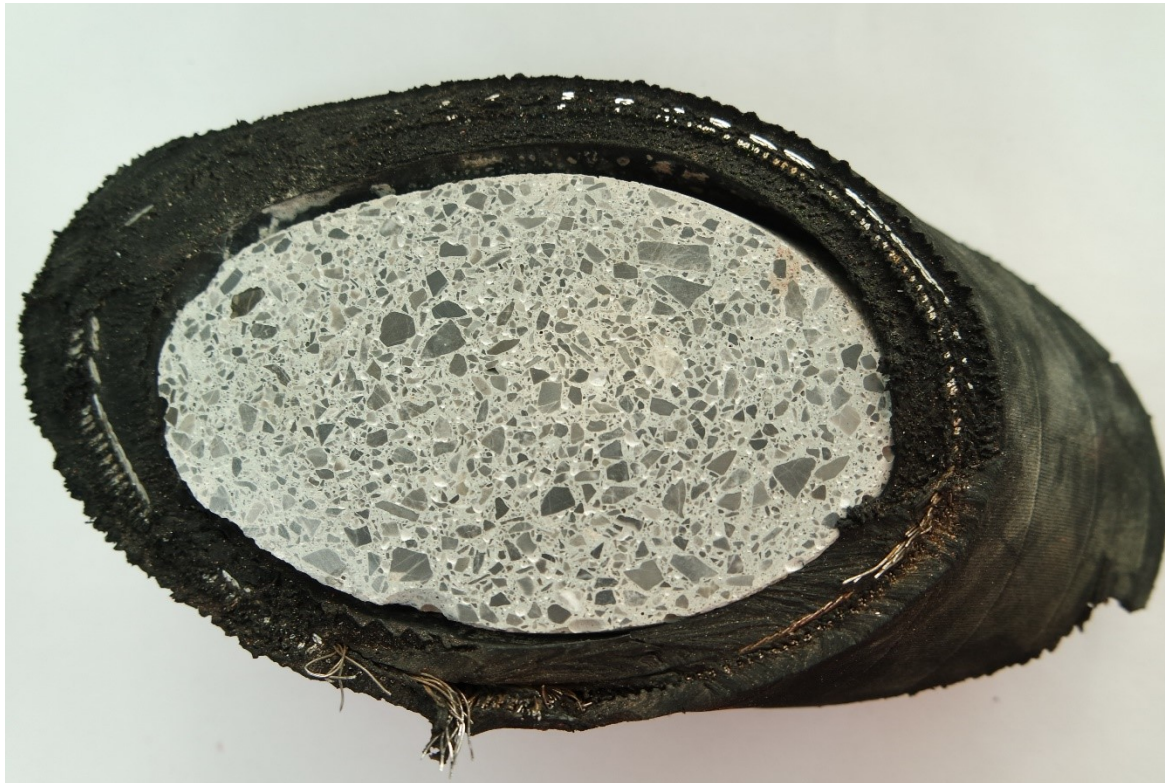


Versuch Nr.	Sliper Fließgrenze	Sliper Viskosität
A1a	-1,11	3,59
A2	-0,46	3,74
A3	0,76	4,70
A4	-0,54	2,60
A5	-0,16	6,02
A6	0,16	2,17
A7	0,98	3,60
A8	0,52	4,46
A9	0,47	1,22

Verarbeitbarkeit/Pumpbarkeit



Verarbeitbarkeit/Pumpbarkeit



Es bedarf soviel Leimvolumen, damit die Zwischenräume der Gesteinskörnung ausgefüllt werden und zusätzlich die Ausbildung einerer Gleitschicht ermöglicht wird.

Dafür sind zumindest 380 kg/m^3 Bindemittel bzw. 310 Liter/m^3 Leimvolumen nötig!

Verarbeitbarkeit/Pumpbarkeit Zusammenfassung

- Mindest-Bindemittelgehalt: 380 kg/m²
- Mindestgehalt an Leimvolumen: 310 Liter/m²
- Ausbreitmaß im Bereich. 45 – 70 cm
- Luftgehalt verbessert die Pumpbarkeit, kann aber mangelndes Leimvolumen **nicht** ersetzen!
- Sliper-Messung korreliert gut mit der Pumpbarkeit

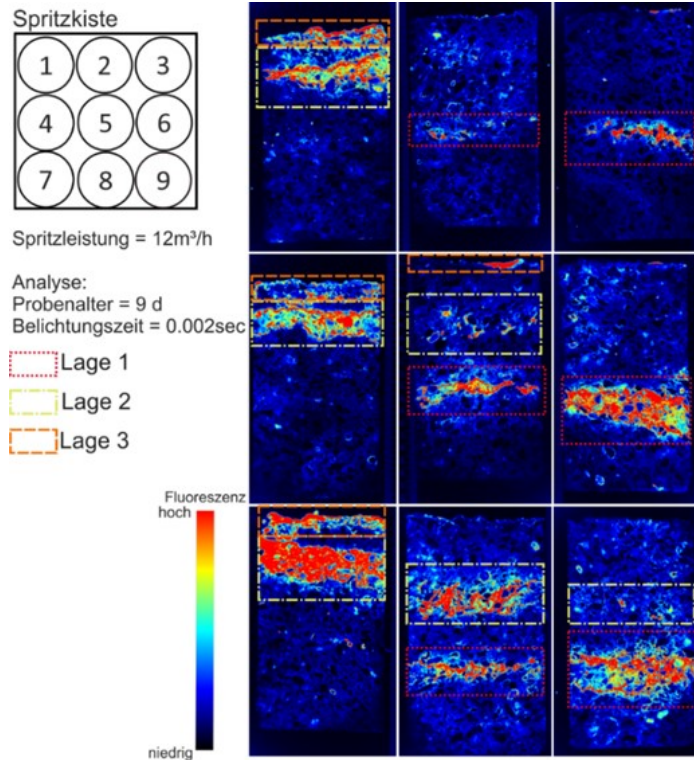
Video Zeitraffer mit verschiedenen Leistungen



Spritzversuch Zams-II



Lagenbildung infolge Pulsatuion



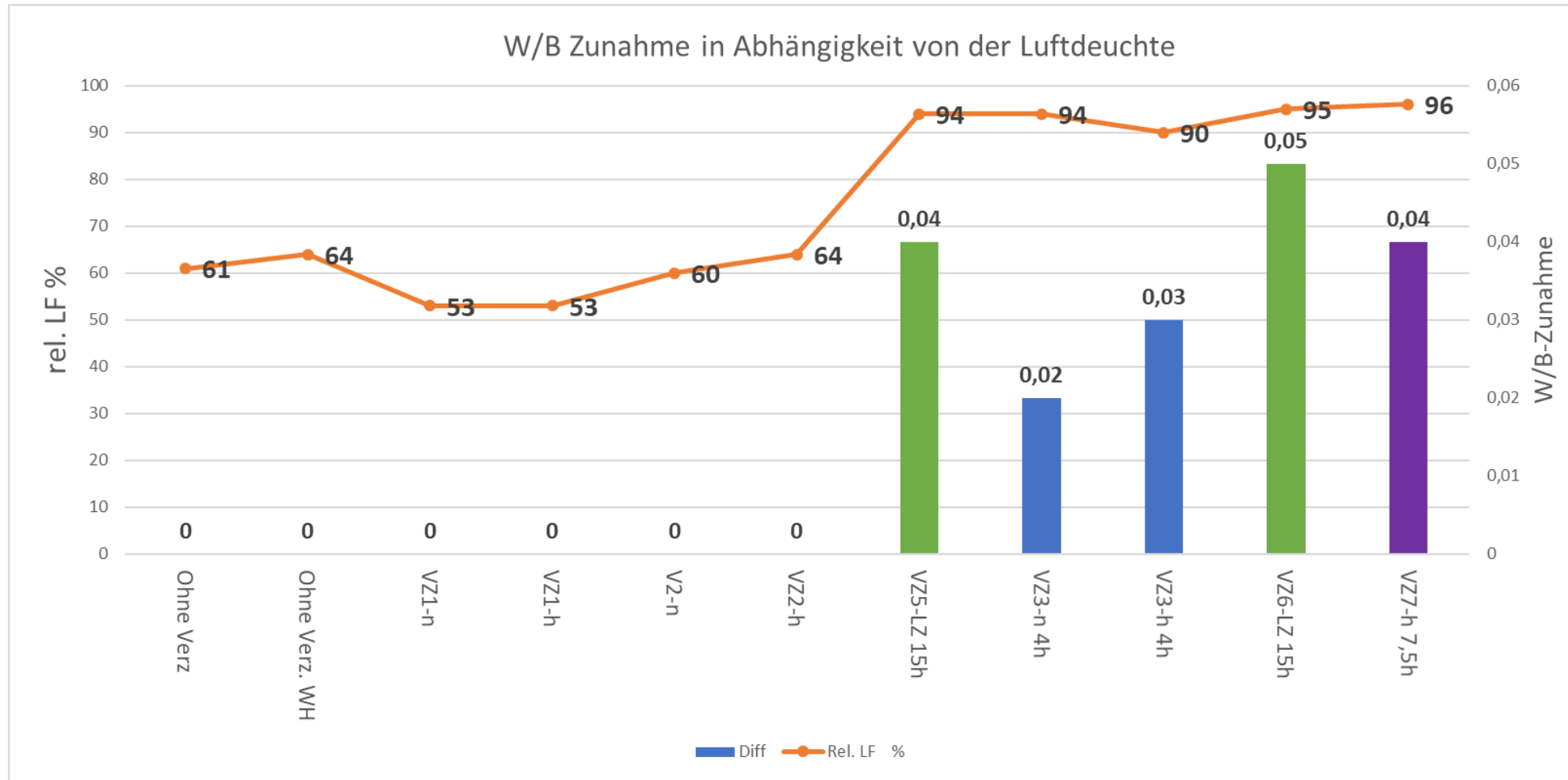
Einfluss von Verzögerern auf Spritzbeton

- Für diese Untersuchung wurden 8 handelsübliche Verzögerer von 4 verschiedenen Herstellern zunächst labortechnisch hinsichtlich Verzögerungsleistung und erforderlicher Optimaldosierung untersucht.
- 6 Verzögerer wurden auch im Zuge von Großspritzversuchen mit jeweils 2 Dosierungen (niedrig und hoch) und verschiedenen Haltezeiten (0,5h,4h,24h) bezüglich ihrer Performance geprüft.
- Dabei wurde neben dem Abbinde- und Festigkeitsverhalten auch die Verarbeitbarkeit (Konsistenz und Pumpbarkeit) als auch die Dauerhaftigkeit geprüft

Für Verzögerer-Versuche ausgewählte Produkte

Nr.	Hersteller	Basis
VZ 1	A	Zucker (Saccharose)
VZ 2	A	Tetrakaliumpyrophosphat
VZ 3	B	2-Phosphonobutan-1,2,4-tricarbonsäure + Citronensäuremonohydrat
VZ 4	C	Phosphonsäure
VZ 5	C	Gluconate
VZ 6	D	Nitrilomethylenphosphonat+citronensäure
VZ 7	D	Alkaliphosphat + Monosaccharide
VZ 8	D	Zucker (Saccharose)

Einfluss von Verzögerern auf den W/B-Wert je nach Luftfeuchte



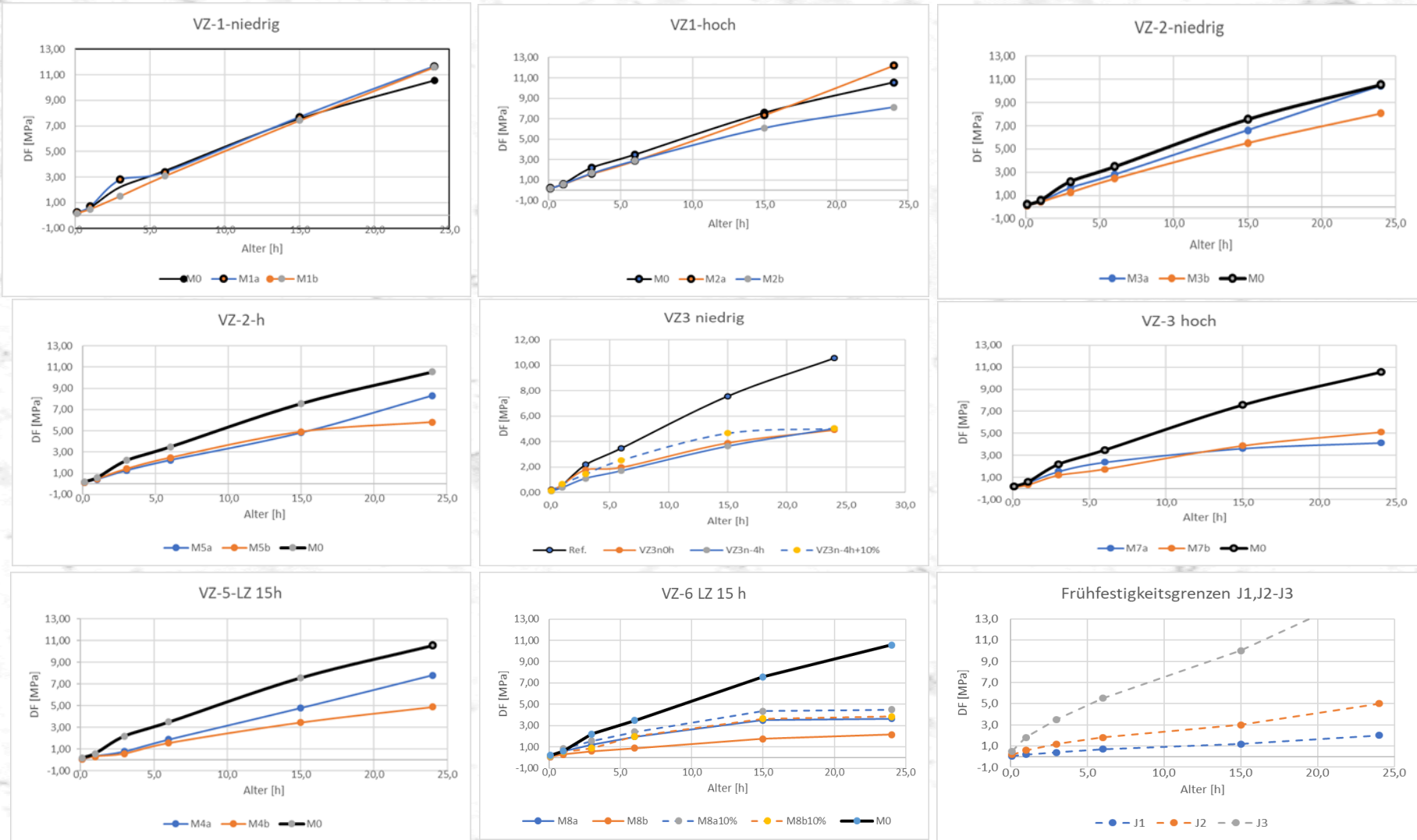
Normierte Frühfestigkeitsentwicklung

Werte wurden durch Interpolation der Messpunkte für entsprechendes Alter ermittelt

	Druckfestigkeit [MPa]											
Alter [h]	M0	M1A	M1B	M2A	M2A	M3A	M3A	M4A	M4A	M5a	M5b	M0-W
0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,14	0,13	0,06	0,07	0,13	0,13	0,14
1	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6	0,46	0,43	0,37	0,31	0,42	0,47	0,62
3	2,2	2,8	1,5	1,6	1,7	1,65	1,25	0,79	0,56	1,25	1,40	1,40
6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,9	2,80	2,44	1,88	1,54	2,22	2,45	2,96
15	7,6	7,7	7,4	7,3	6,1	6,72	5,53	4,78	3,45	4,81	4,90	5,62
24	10,6	11,7	11,6	12,2	8,1	10,45	8,08	7,80	4,89	8,31	5,80	6,08

	Druckfestigkeit [MPa]										
Alter [h]	M6a	M6b	M6a-10%	M7a	M7B	M8A	M8B	M8A 10	M8B 10%	M9A	M9B
0,1	0,16	0,09	0,12	0,13	0,11	0,14	0,06	0,13	0,14	0,14	0,14
1	0,60	0,36	0,66	0,52	0,32	0,56	0,28	0,84	0,54	0,43	0,50
3	1,80	1,10	1,45	1,55	1,20	1,20	0,59	1,55	0,89	0,90	0,97
6	1,97	1,69	2,54	2,38	1,75	1,95	0,87	2,47	1,53	1,96	1,70
15	3,60	3,63	4,66	3,63	3,87	3,50	1,77	4,36	3,66	4,35	3,95
24	4,91	5,02	5,03	4,93	5,10	3,65	2,15	4,50	3,85	6,85	5,98

Graphische Darstellung der normierten Frühfestigkeit



Zusammenfassung der Verzögerer-Prüfungen

- Verzögerer haben praktisch keinen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit.
- Bei kühler und feuchter Witterung kann es jedoch bei langer Haltezeit zu Kondensationserscheinungen im Mischwagen kommen, was zu einer beträchtlichen Erhöhung des W/B-Wertes um bis zu 0,05 führen kann und als dessen Folge einer Verminderung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit.
- Für Langzeitverzögerung sind nur dafür ausgewiesene Verzögerer geeignet, weil normale Verzögerer nach mehr als 8 Stunden die Verzögerung nicht mehr gewährleisten können und zu Ansteifeffekten neigen.
- Bei Überdosierung von Verzögerern und bei Langzeitverzögerung kann es zu beträchtlicher Absenkung der Frühfestigkeit bis 24 Stunden kommen. Die Frühfestigkeitsminderung kann bis zu 70% betragen.
- Auf die Endfestigkeit haben Verzögerer hingegen keinen Einfluss.

- Auf die Dauerhaftigkeit des Spritzbetons haben Verzögerer kaum einen Einfluss, es sei denn indirekt als Folge von W/B-Wert-Erhöhung infolge Kondensation bei kalter und feuchter Witterung und langer Haltezeit.
- Langzeit-verzögerte Spritzbetone zeigten eine verminderte Sulfat-Beständigkeit, die allerdings mit großer Wahrscheinlichkeit dem durch Kondensation verursachten W/B-Anstieg anzulasten ist.
- Verzögerte Spritzbetone scheinen eine etwas verminderte Beständigkeit bei Sulfatangriff zu haben
- Verzögerer scheinen die Fähigkeit von Metakaolin zur Bindung von Portlandit leicht zu schwächen. Ein wesentlicher Einfluss auf den RV-Wert besteht jedoch nicht.
- Bezüglich der Phasenentwicklung senken alle Verzögerer die Ettringit-Bildung naturgemäß um ca. ein Drittel ab. Ein kleiner positiver Einfluss besteht bei manchen Verzögerern auf die nach 48 Stunden einsetzende Monocarbonat-Bildung.

Danke!