



**Ermittlung der Grünzugfestigkeit erdfeuchter
Zementleimgemische als Grundlage für die Optimierung der
Produktion von sofort entschalten Betonwaren**

**Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
01. Februar 2019**



Erdfeuchter Beton für die Herstellung von Betonwaren- sofortige Entschalung

Anwendungsbeispiele in der Praxis



Erdfeuchter Beton- sofortige Entschalung

- **Unmittelbar formgebendes Produktionsverfahren: endgültige Form wird innerhalb weniger Sekunden-Minuten erreicht und beibehalten**
- **Ohne chemische Bindungen durch die Zementreaktion (Hydratation)**

Erdfeuchter Beton- Anwendungen im Bereich Ortbeton



**Walzbeton
Ga-La-Bau,
Estriche**

Erdfeuchter Beton- Verarbeitung



Erdfeuchter Beton- Unterscheidungsmöglichkeiten



Drei Betone mit Unterschieden:

- **Zement,**
- **w/z-Wert,**
- **Zusatzstoff,**
- **Sieblinien**



Erdfeuchter Beton- Unterscheidungsmöglichkeiten



Drei Betone mit Unterschieden:

- **Zement,**
- **w/z-Wert,**
- **Zusatzstoff,**
- **Sieblinien**

- **Optisch ohne erkennbare Unterschiede**
- **„Erdfeuchter Beton, der für besondere Verdichtungsverfahren entworfen wurde“: Konsistenz normativ nicht klassifiziert**
- **Prüfverfahren zur Abgrenzung der unterschiedlichen Eigenschaften steht nicht zur Verfügung**
- **Entwicklung neuer Rezepturen (Wechsel der Ausgangsstoffe) findet bisher in situ durch Anwendung in der Produktion statt**

Zielstellung der Arbeit

- **Theoretische Grundlagen für Bindemechanismen der Haftkräfte in erdfeuchten Zementleimen identifizieren**
- **Prüfverfahren entwickeln, mit dem erdfeuchte Zementleimgemische voneinander unterschieden werden können**
- **Optimierung von erdfeuchten Zementleimgemischen anhand von Versuchsergebnissen**



Erdfeuchte Zementleime – erdfeuchte Betone

**< 100 μ ,
größte Partikelanzahl,
größte Oberfläche,
Homogener,
Geringerer Einfluss von
Reibungskräften,
Allgemeine Betrachtungsebene
für Haftkräfte in der Literatur**

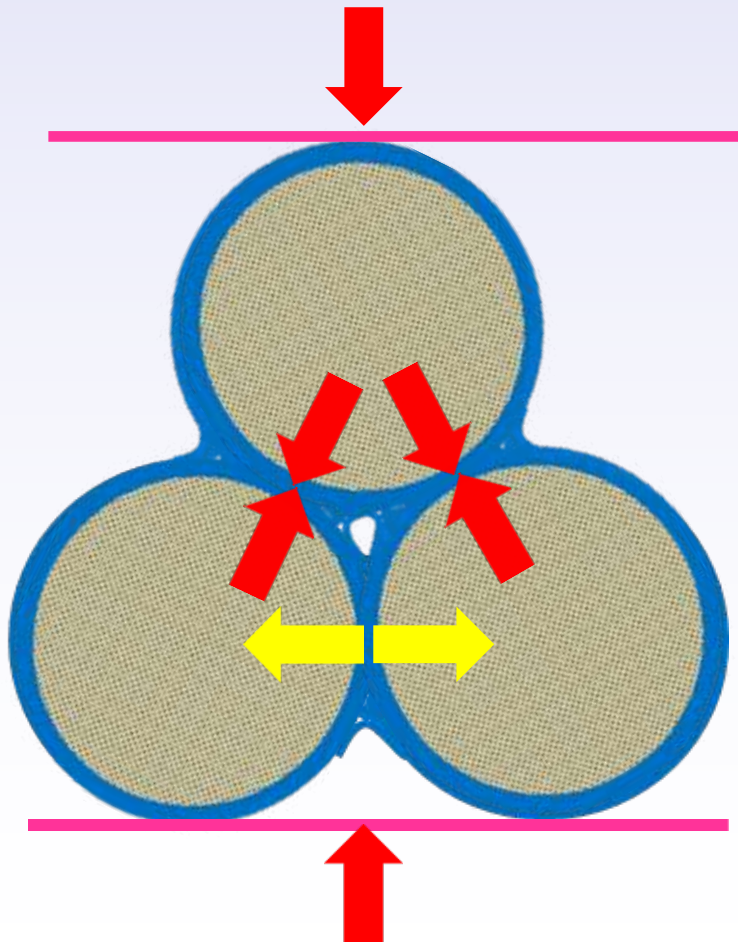
**16 mm GK,
div. Gesteinskörnungen möglich,
Variationen von Sieblinien
Größere Prüfstreuung vermutet**

Zementleim - Gemisch aus Feststoffen mit unterschiedlicher Größe und Form



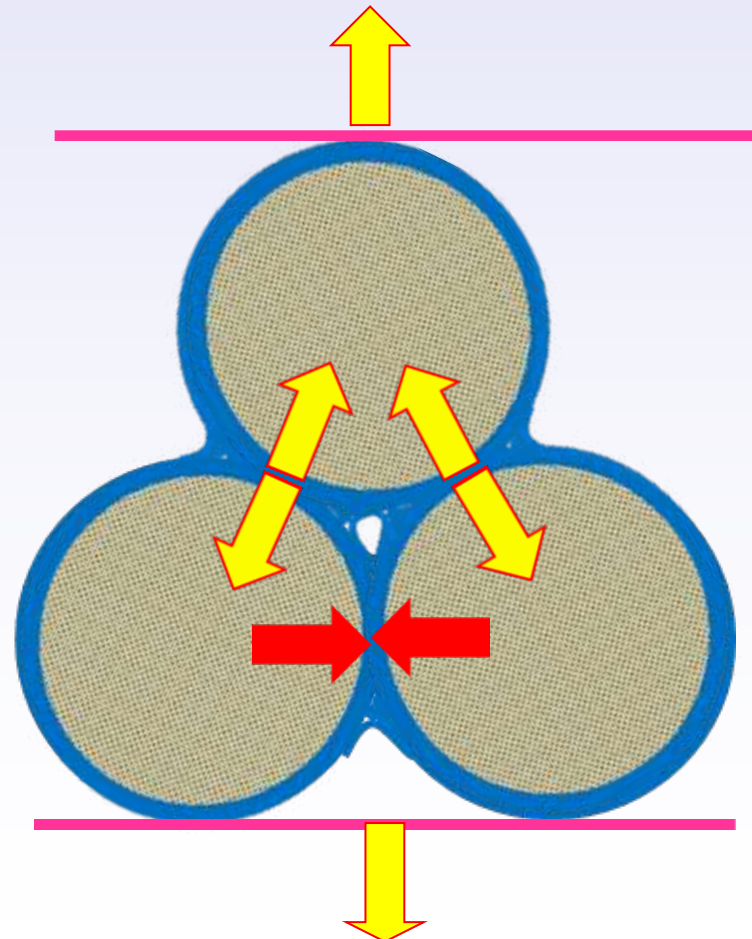
Haftkräfte- Voraussetzung für die Übertragung von

Druckkräften



Formstabilität

Zugkräften



Gefügestabilität

Haftkräfte - Beispiele



**Druckfestigkeit von
feuchtem Quarzsand 100g
und Wasser 20 ml
[Czernin, Zementchemie]**

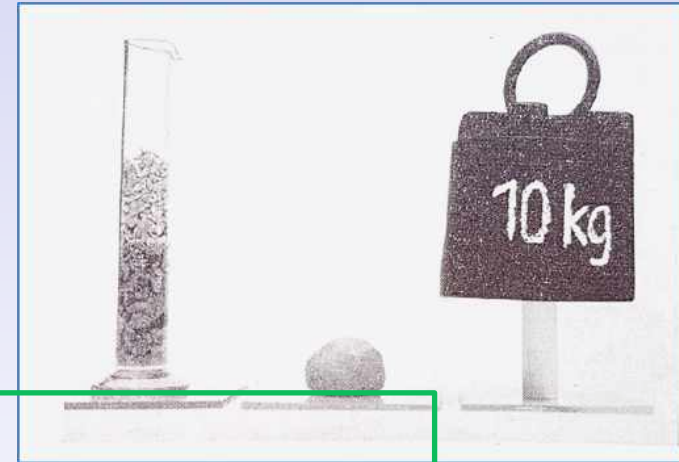
Haftkräfte - Übersicht

1. **Adsorptionsschichten aus Wasser**
2. **Flüssigkeitsbrücken**
3. **Van-der-Waals-Kräfte**
4. **Van-der-Waals-Kräfte aufgrund von plastischen Verformungen**
5. **Elektrostatische Kräfte (anziehend und abstoßend)**
6. **Gewichtskräfte**
7. **Chemische Bindungen**
8. **Magnetische Kräfte**
9. **Reibung und Verzahnung**



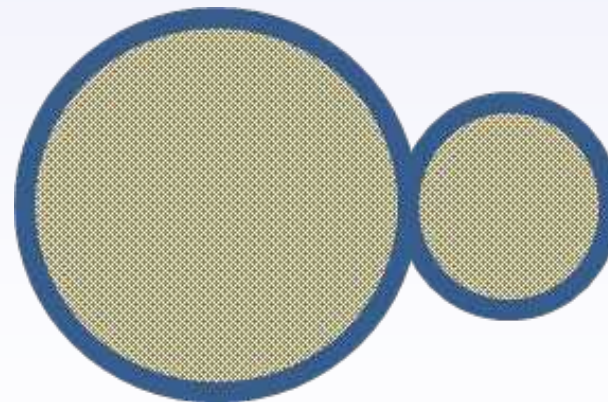
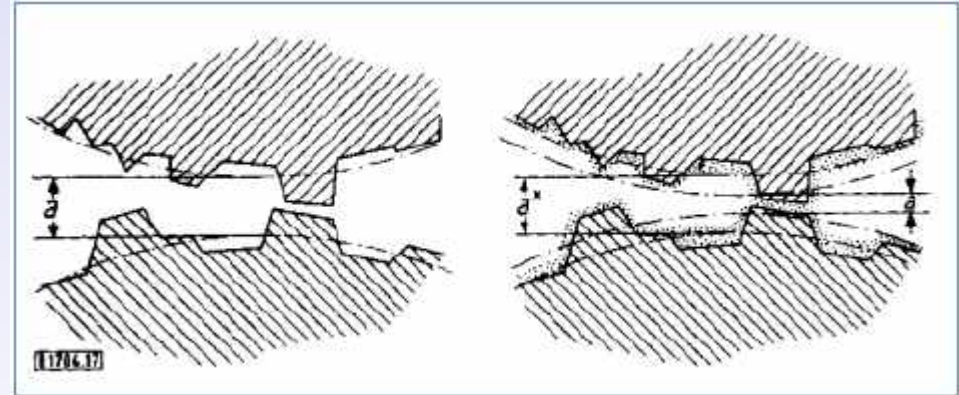
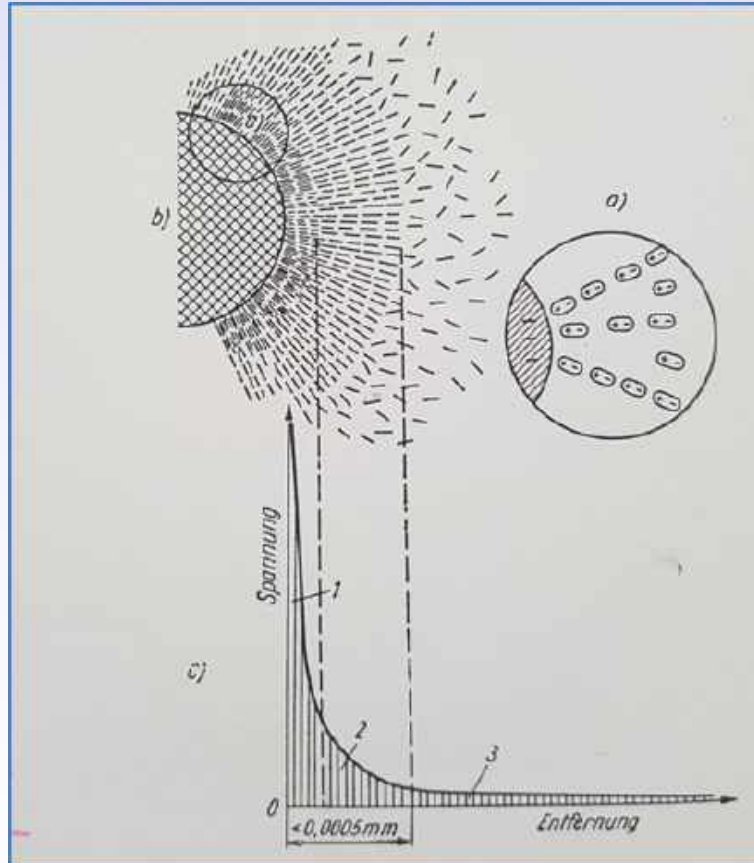
Haftkräfte - Übersicht

1. Adsorptionsschichten aus Wasser
2. Flüssigkeitsbrücken
3. Van-der-Waals-Kräfte
4. Van-der-Waals-Kräfte aufgrund von plastischen Verformungen
5. ~~Elektrostatische Kräfte (anziehend und abstoßend)~~
6. ~~Gewichtskräfte~~
7. ~~Chemische Bindungen~~
8. ~~Magnetische Kräfte~~
9. Reibung und Verzahnung



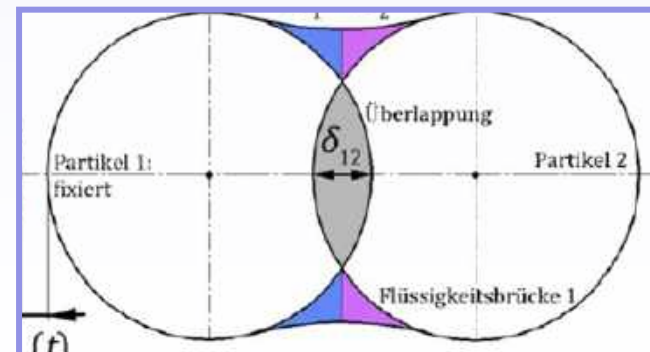
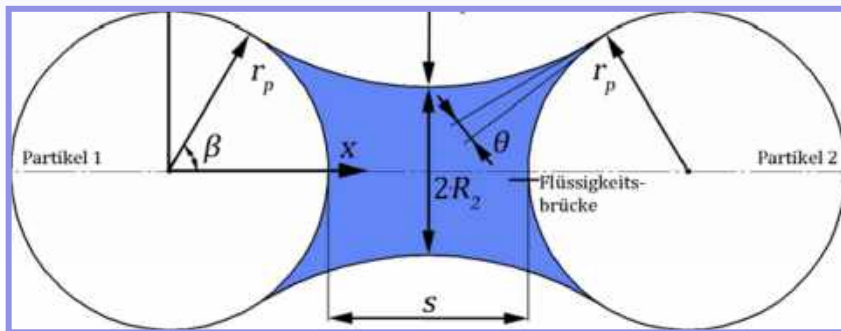
Gegenstand bisheriger Untersuchungen
[Wierig, Bornemann, Hüsken], Druckfestigkeit

Haftkräfte - Adsorptionsschichten aus Wasser

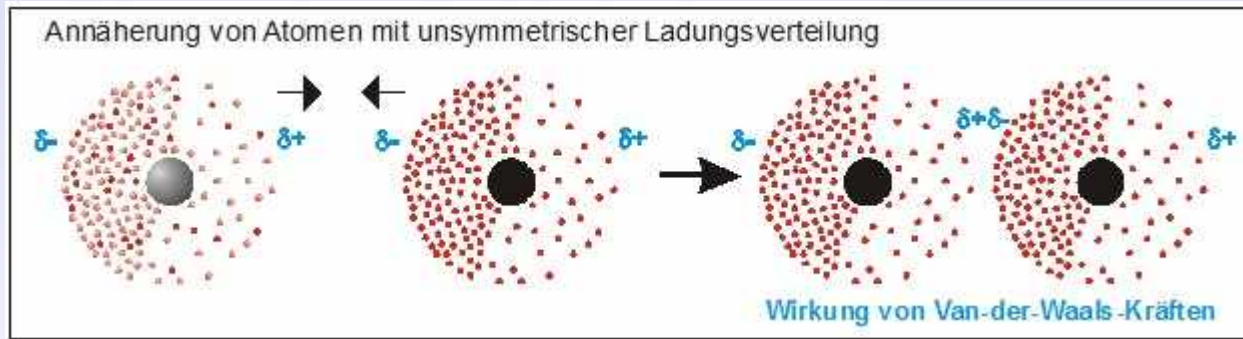


- **Zugspannung der adsorbierten Wasserfilme**
- **Kontaktfläche**

Haftkräfte - Flüssigkeitsbrücken (Kapillarkräfte)

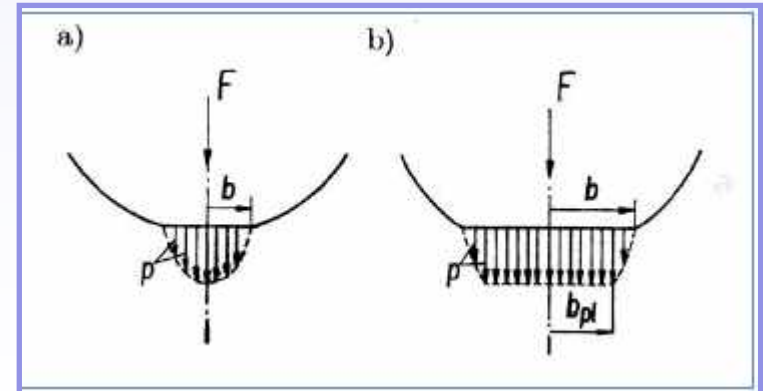
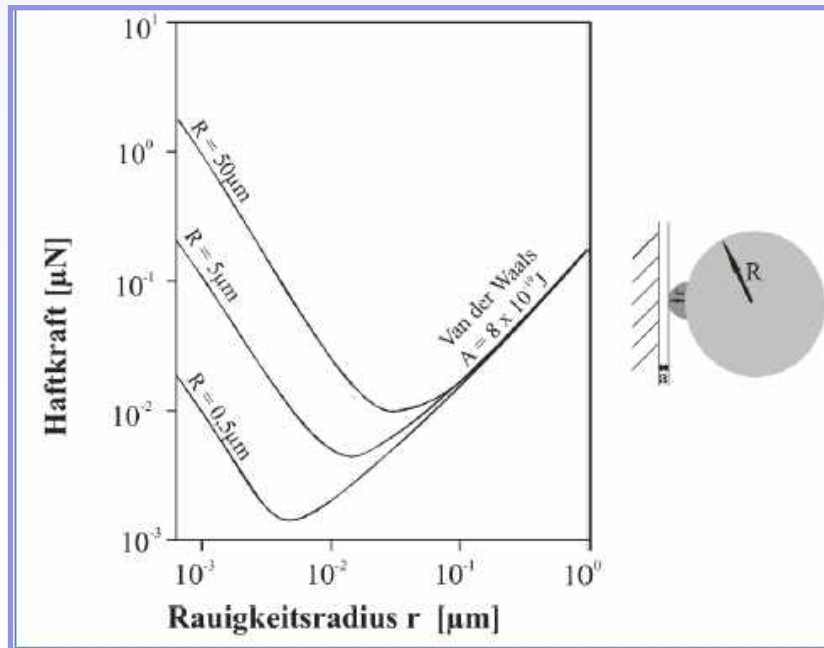


Haftkräfte - Van-der-Waals-Kräfte

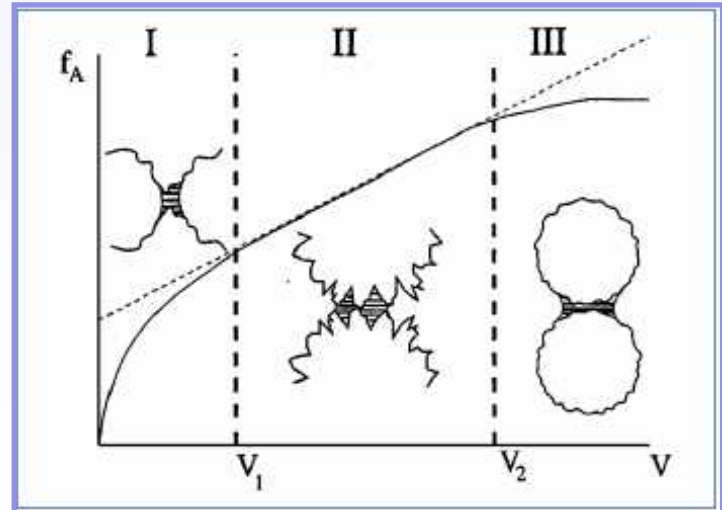
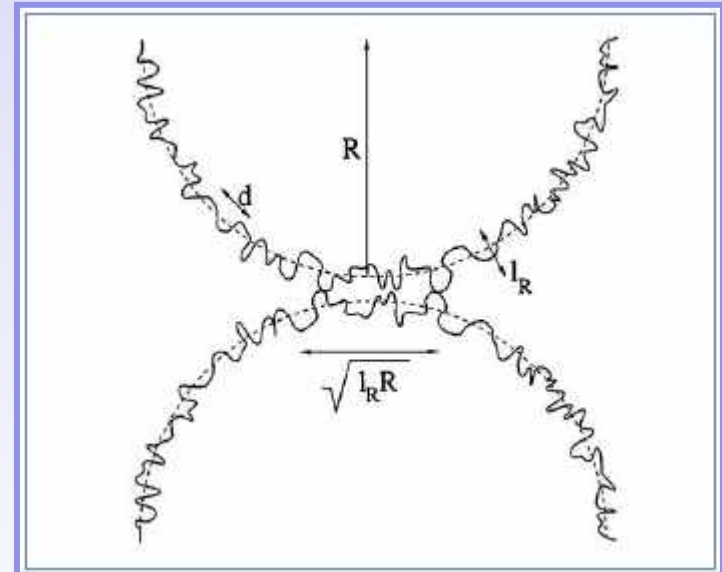
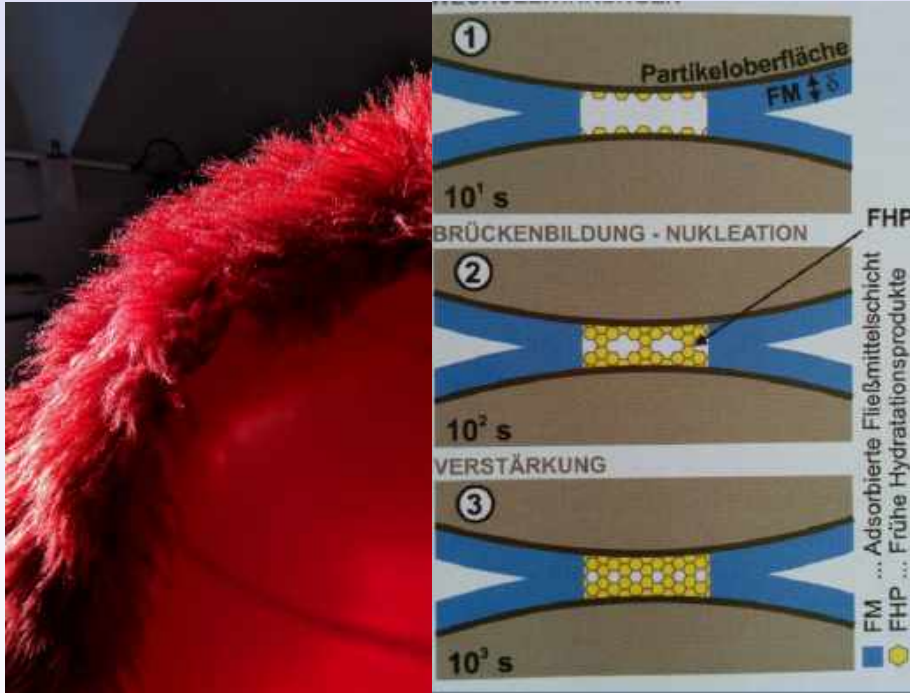


Schwache Bindungskräfte auf molekularer Ebene durch temporäre Dipole

Stärkere Bindungskräfte auf Ebene Festkörper-Festkörper



Haftkräfte - Beschaffenheit der Partikeloberflächen



($d = 10\mu$)

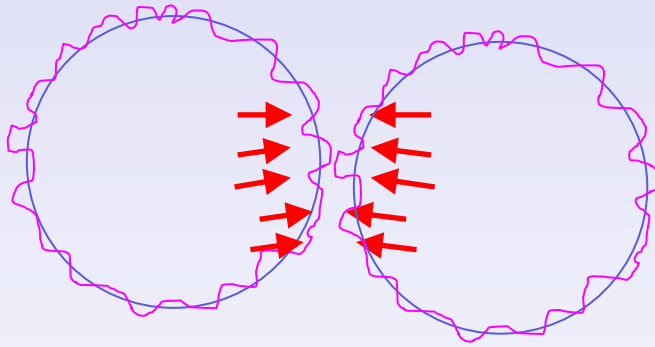
Partikeloberfläche glatt:

$314 \mu^2$

Partikeloberfläche rau ($d_{Rauh} = 0,5\mu$):

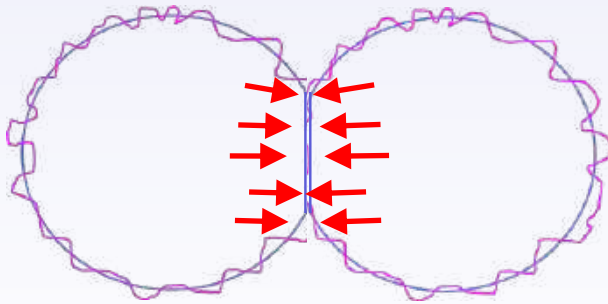
$6.400 \mu^2$

Partikeloberflächen- Deformationen durch Haftkräfte



Partikel mit Rauigkeiten

[Wasserfilm nicht dargestellt]



Haftkräfte führen zu

- Deformationen der Rauigkeiten
- Deformationen der Partikel
(elastisch oder plastisch)

Vergrößerung der Kontaktfläche führt zu
Vergrößerung der Haftkräfte

Deformationsverhalten der Partikel ist abhängig
von dem Materialverhalten, der Mikrohärtte

Haftkräfte - Beispielrechnung

Ein Kontakt von zwei Zementpartikeln, $10\ \mu (=D1)$ und $1\ \mu (=D2)$

Annahme: ideal rund und glatt, Wasserfilm von $0,03\ \mu$

zwei verschiedene Mikrohäärten der Oberfläche

Kraftart

Adsorptionsfilme

Flüssigkeitsbrücke

Van-der-Waal

Van-der-Waal plastisch

Gesamthaftkraft

Gewichtskraft des kleineren Partikels F_{p2}

Gesamtverformung [Nanometer]

Haftkräfte - Beispielrechnung

Ein Kontakt von zwei Zementpartikeln, $10\ \mu$ (=D1) und $1\ \mu$ (=D2)

Annahme: ideal rund und glatt, Wasserfilm von $0,03\ \mu$

zwei verschiedene Mikrohäärten der Oberfläche

	Zement ohne Hydratationsprodukte Mikrohäerte $732\ \text{N/mm}^2$ (ca. Feldspat)	
Kraftart	[N]	Prozent
Adsorptionsfilme	$1,67\text{E-}07$	10,87
Flüssigkeitsbrücke	$1,28\text{E-}06$	83,29
Van-der-Waal	$1,99\text{E-}08$	1,29
Van-der-Waal plastisch	$6,99\text{E-}08$	4,55
Gesamthaftkraft	$1,54\text{E-}06$	100,00
Gewichtskraft des kleineren Partikels F_{p2}	$1,59\text{E-}11$	0,001

Gesamtverformung [Nanometer]	0,7
---------------------------------	-----

Haftkräfte - Beispielrechnung

Ein Kontakt von zwei Zementpartikeln, $10\ \mu (=D1)$ und $1\ \mu (=D2)$

Annahme: ideal rund und glatt, Wasserfilm von $0,03\ \mu$

zwei verschiedene Mikrohäärten der Oberfläche

	Zement ohne Hydratationsprodukte Mikrohärte $732\ \text{N/mm}^2$ (ca. Feldspat)		Zement mit ersten Hydratationsprodukten Mikrohärte $2,4\ \text{N/mm}^2$ (ca. Talk)		maximale Reichweite
Kraftart	[N]	Prozent	[N]	Prozent	[Nanometer]
Adsorptionsfilme	$1,67\text{E-}07$	10,87	$1,67\text{E-}07$	0,73	500 nm
Flüssigkeitsbrücke	$1,28\text{E-}06$	83,29	$1,28\text{E-}06$	5,62	60(2 x dlq)
Van-der-Waal	$1,99\text{E-}08$	1,29	$1,99\text{E-}08$	0,09	50 nm
Van-der-Waal plastisch	$6,99\text{E-}08$	4,55	$2,13\text{E-}05$	93,56	50 nm
Gesamthafkraft	$1,54\text{E-}06$	100,00	$2,28\text{E-}05$	100,00	
Gewichtskraft des kleineren Partikels F_{p2}	$1,59\text{E-}11$	0,001	$1,59\text{E-}11$	0,00007	
Gesamtverformung [Nanometer]	0,7		210		

Haftkräfte - Zusammenfassung

Auswirkungen auf Haftkräfte von:

- Partikelform (rund/ eckig/ flach)
- Partikeloberflächen (glatt/ rauh)
- Härte der Partikeloberflächen (hart/ weich)
- Wasserfilm (Dicke/ Verteilung)



Theoretische Annäherung bietet keine eindeutige Vorhersage über die zentrische Zugkraft

Ermittlung der theoretischen Zugfestigkeit erdfeuchter Zementleime zusätzlich abhängig von

- Reibung und Verzahnung
- Modelle der Packungsdichte (Koordinationszahlen)
- Annahmen zu Partikeldurchmessern und -verteilungen



Daher: Überprüfung des Verhaltens durch Versuche

Versuchsprogramm

Zentrische Zugkräfte an Zementleimen:

- **Drei verschiedene Zemente einer Festigkeitsklasse**
- **Jeder Zement mit jedem der vier Zusatzstoffe**
- **Jeder Zement mit Kombinationen aus zwei Zusatzstoffen**
- **5-15 M.-% an Zusatzstoffen:**
Prüfung der Detektierbarkeit von Unterschieden anhand der Messwerte (Zugkraft, Dehnweg)

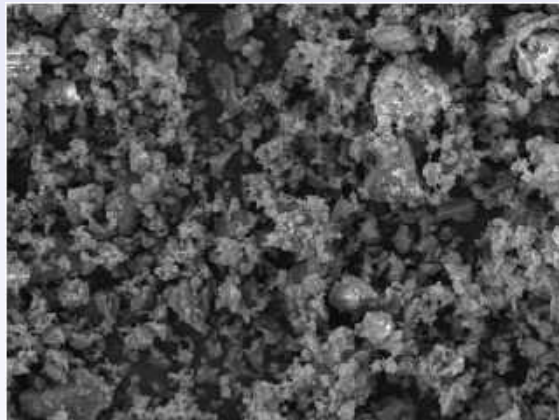
Fragestellungen:

- **Können Unterschiede im Zug-Dehnungsverhalten von Zementleimen variierender Zusammensetzung gemessen werden?**
- **Besteht ein Zusammenhang zwischen der Granulometrie (Sieblinie, Feinheit) und der Zugfestigkeit?**
- **Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Zugfestigkeit?**
- **Wird das Zugdehnungsverhalten von den Ausgangsstoffen systematisch erkennbar beeinflusst?**

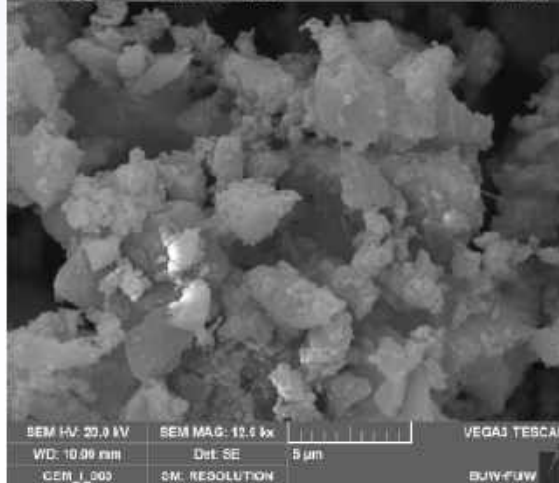
Versuche- Beschaffenheit der verwendeten Ausgangsstoffe

REM 50 μ , 5 μ

CEM I 42,5 R

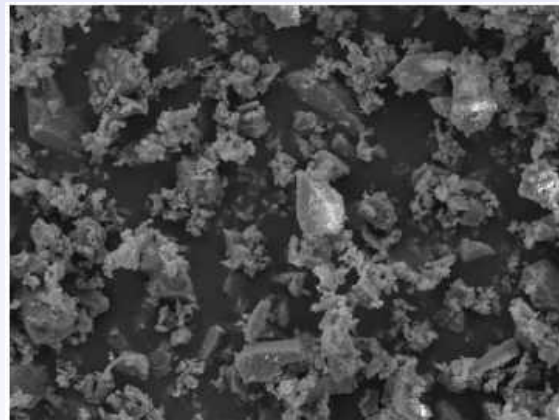


SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 1.50 kx VEGA3 TESCAN
 WD: 10.00 mm Det: SE 50 μ m
 CEM_I_001 SM: RESOLUTION BUW-FUW

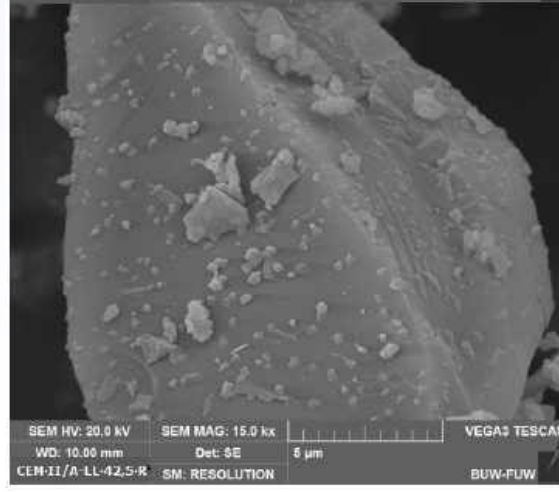


SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 12.0 kx VEGA3 TESCAN
 WD: 10.00 mm Det: SE 5 μ m
 CEM_I_003 SM: RESOLUTION BUW-FUW

CEM II/A-LL 42,5 R

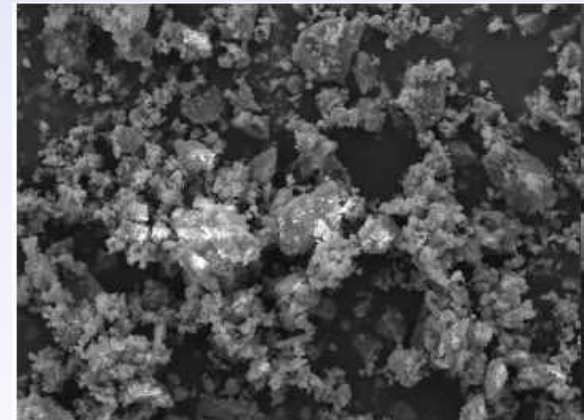


SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 1.50 kx VEGA3 TESCAN
 WD: 10.00 mm Det: SE 50 μ m
 CEM-II/A-LL-42,5-R SM: RESOLUTION BUW-FUW

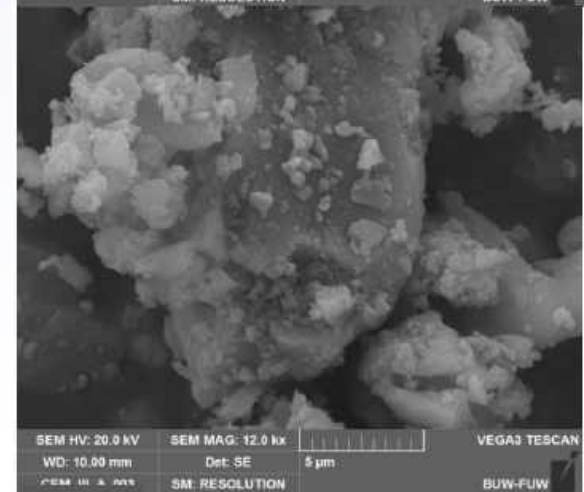


SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 15.0 kx VEGA3 TESCAN
 WD: 10.00 mm Det: SE 5 μ m
 CEM-II/A-LL-42,5-R SM: RESOLUTION BUW-FUW

CEM III/A 42,5 R



SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 1.50 kx VEGA3 TESCAN
 WD: 10.00 mm Det: SE 50 μ m
 CEM_III_A_001 SM: RESOLUTION BUW-FUW

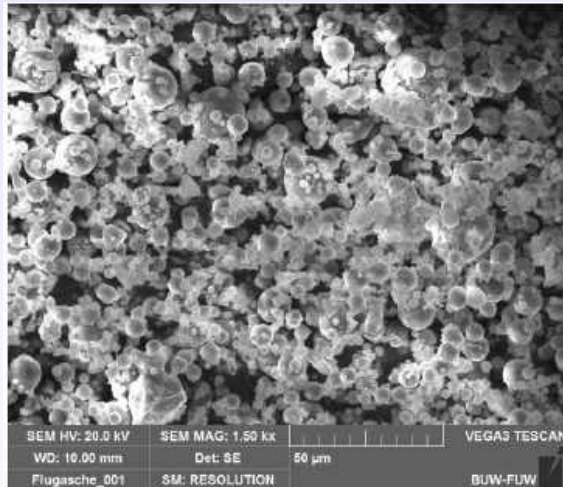


SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 12.0 kx VEGA3 TESCAN
 WD: 10.00 mm Det: SE 5 μ m
 CEM_III_A_003 SM: RESOLUTION BUW-FUW

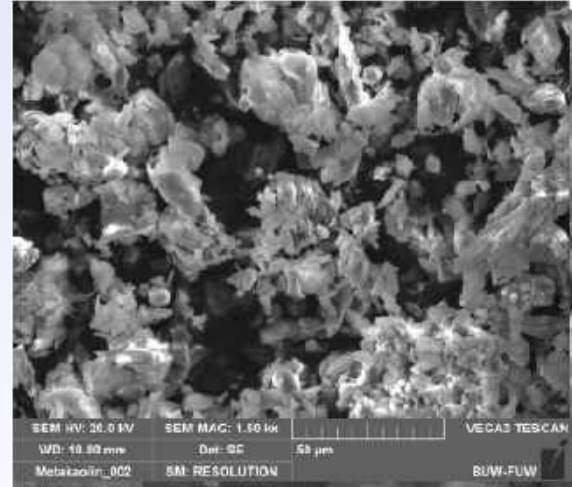
Versuche- Beschaffenheit der verwendeten Ausgangsstoffe

REM 50 μ , 5 μ

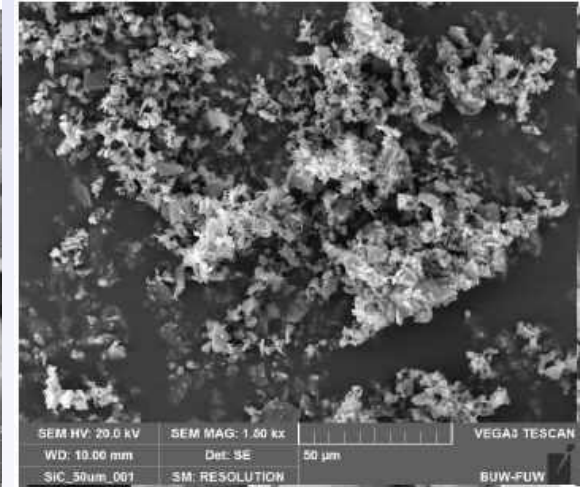
Flugasche



Metakaolin



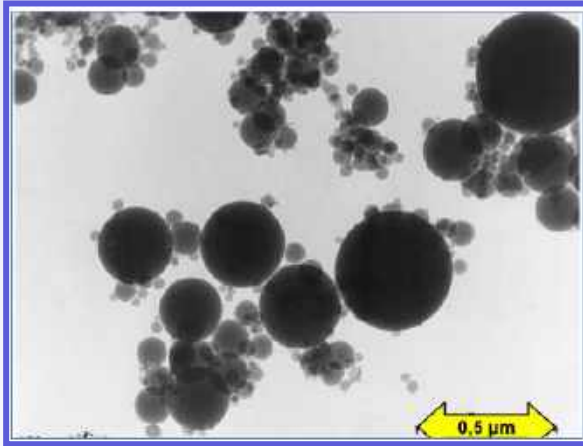
Siliziumcarbid



Versuche- Beschaffenheit der verwendeten Ausgangsstoffe

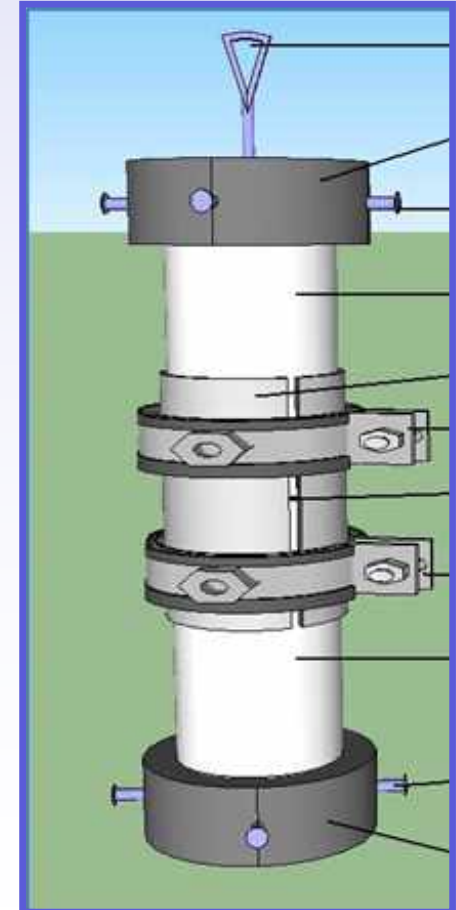
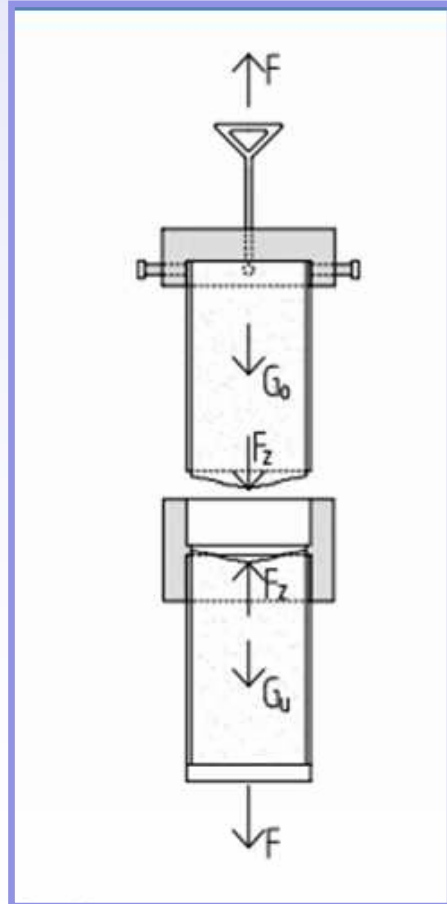
REM 0,5 μ

Mikrosilika

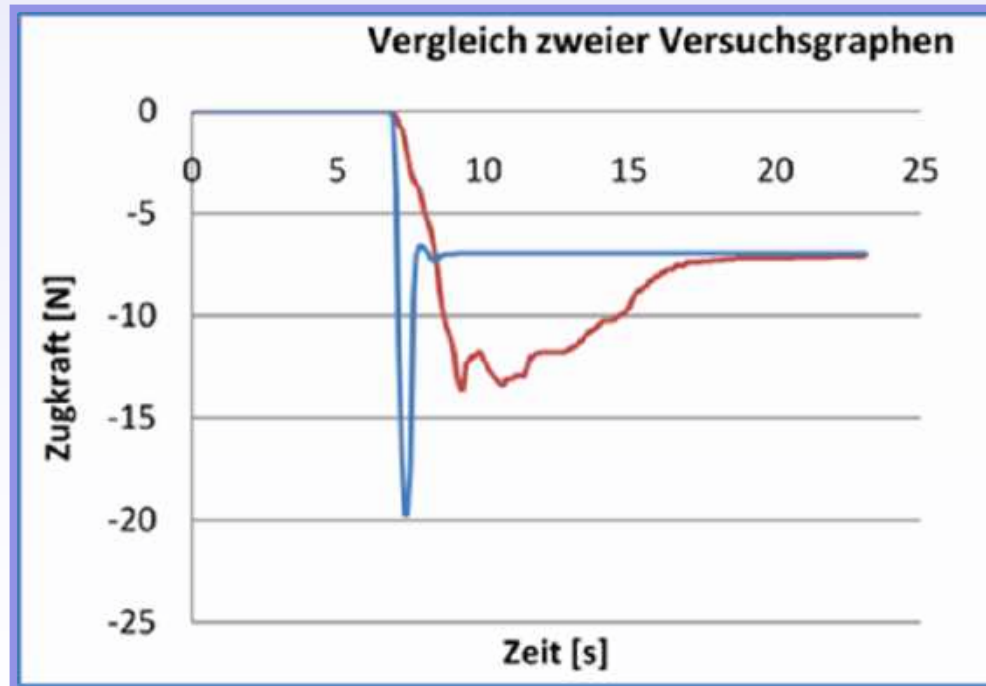


**Unbekannt bei
erdfeuchten
Betonen**

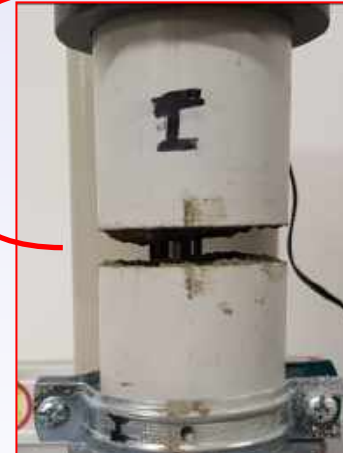
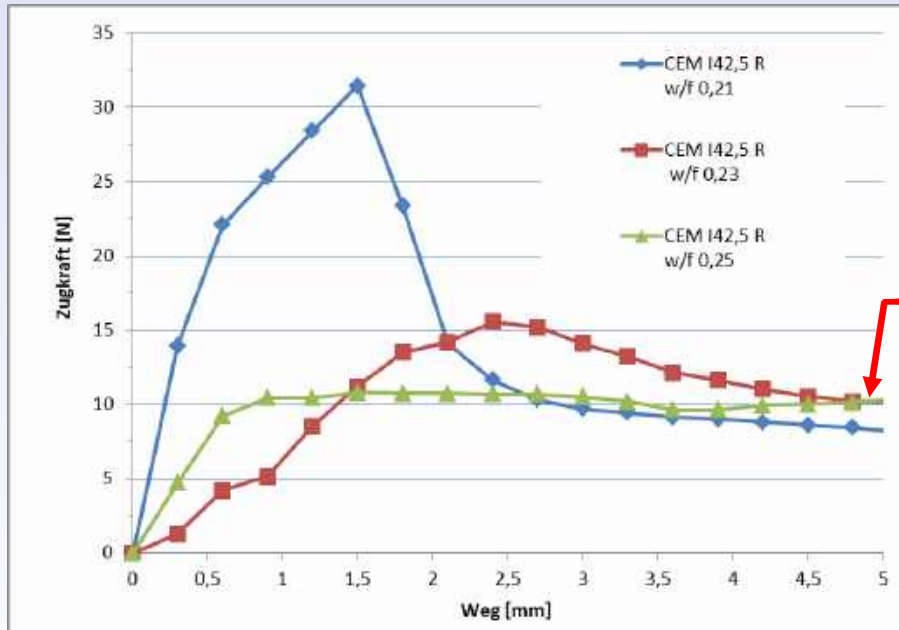
Versuchseinrichtung



Versuchseinrichtung

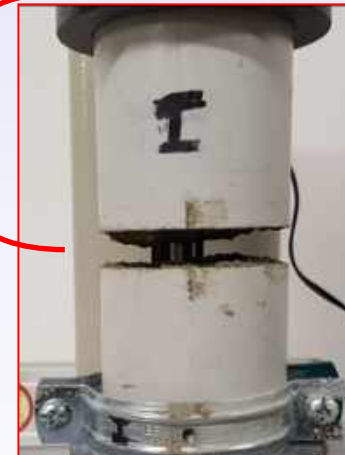
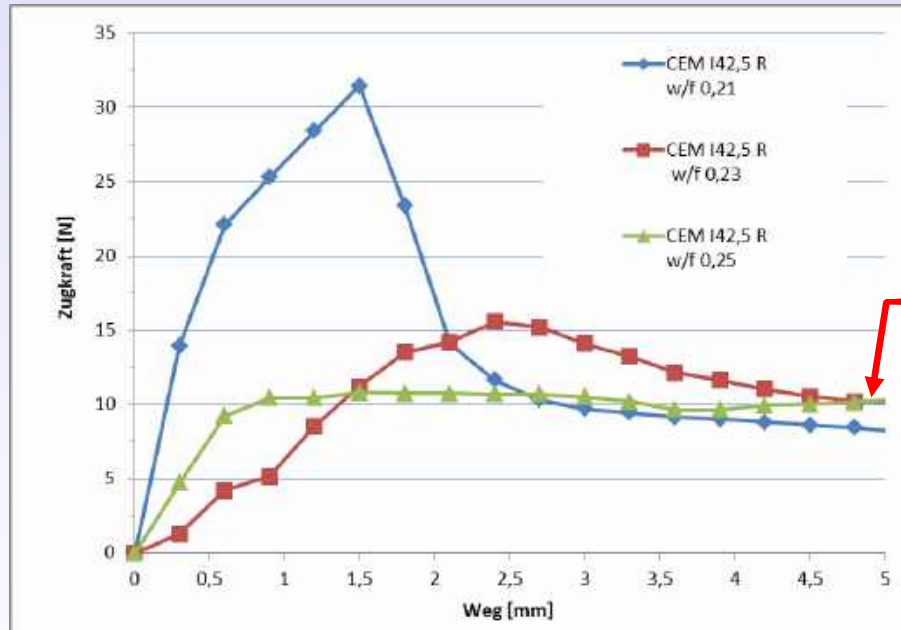


Resultate der Zugversuche



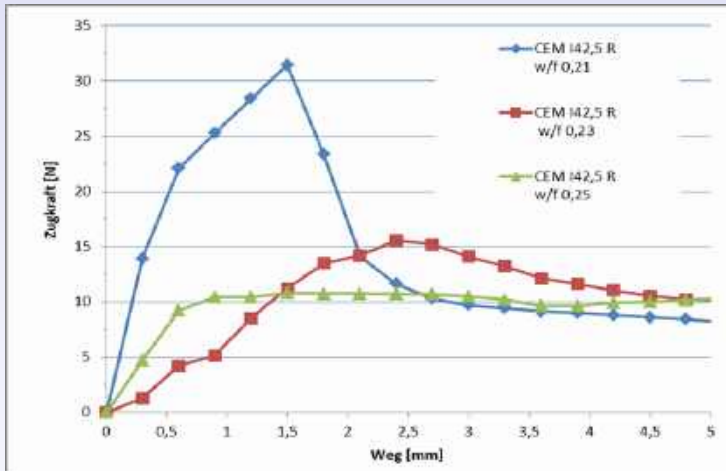
Mischung	CEM I 42,5 R w/z 0,21	CEM I 42,5 R w/z 0,23	CEM I 42,5 R w/z 0,25
w/f-Wert	0,21	0,23	0,25
Oberfläche im Pulver [cm ² /g]	4846	4846	4846
Oberfläche im Leim			
O _L [cm ² /g]	4005	3940	3877
Wasserfilmdicke [μ]	0,43	0,47	0,52
Max. Zugkraft [N]	31,45	15,55	10,80
Weg bei Max. Zugkraft [mm]	1,50	2,40	11,10
Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	22,1	4,2	9,25
Verdichtungsgrad [%]	94,48	98,41	99,72

Resultate der Zugversuche

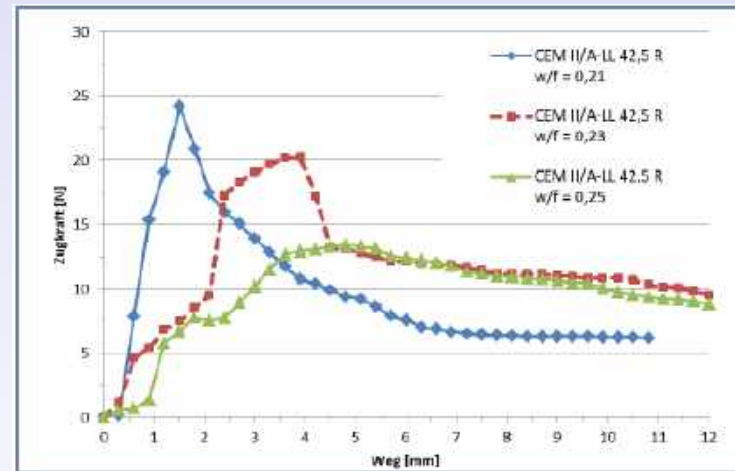


Mischung	CEM I 42,5 R w/z 0,21	CEM I 42,5 R w/z 0,23	CEM I 42,5 R w/z 0,25
w/f-Wert	0,21	0,23	0,25
Oberfläche im Pulver [cm ² /g]	4846	4846	4846
Oberfläche im Leim			
O _L [cm ² /g]	4005	3940	3877
Wasserfilmdicke [μ]	0,43	0,47	0,52
Max. Zugkraft [N]	31,45	15,55	10,80
Weg bei Max. Zugkraft [mm]	1,50	2,40	11,10
Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	22,1	4,2	9,25
Verdichtungsgrad [%]	94,48	98,41	99,72

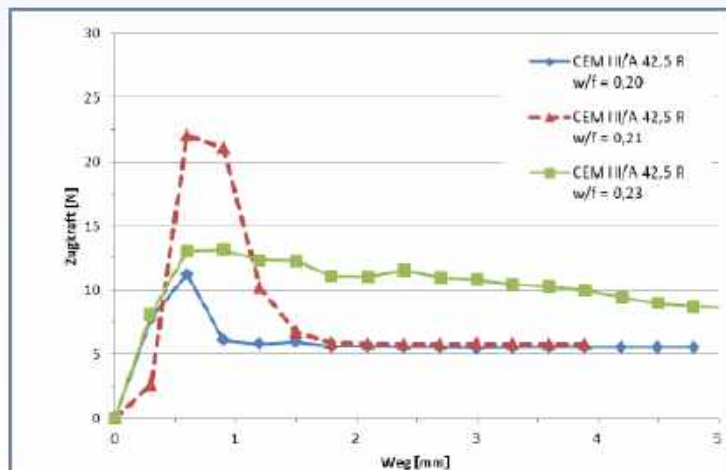
Resultate der Zugversuche: Zement + Wasser



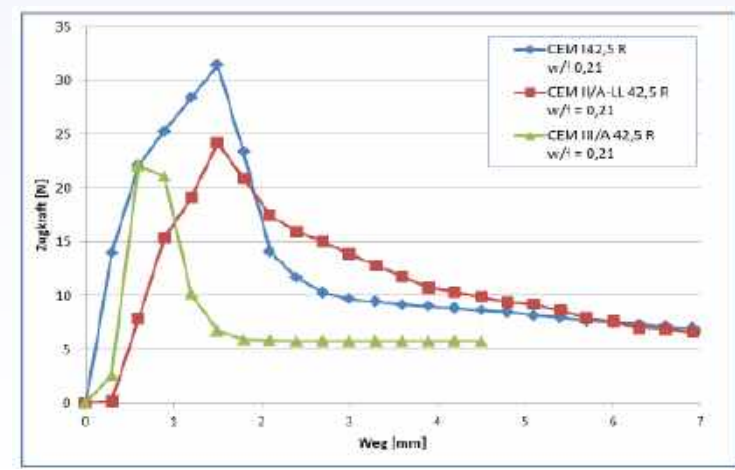
CEM I



CEM II/A-LL

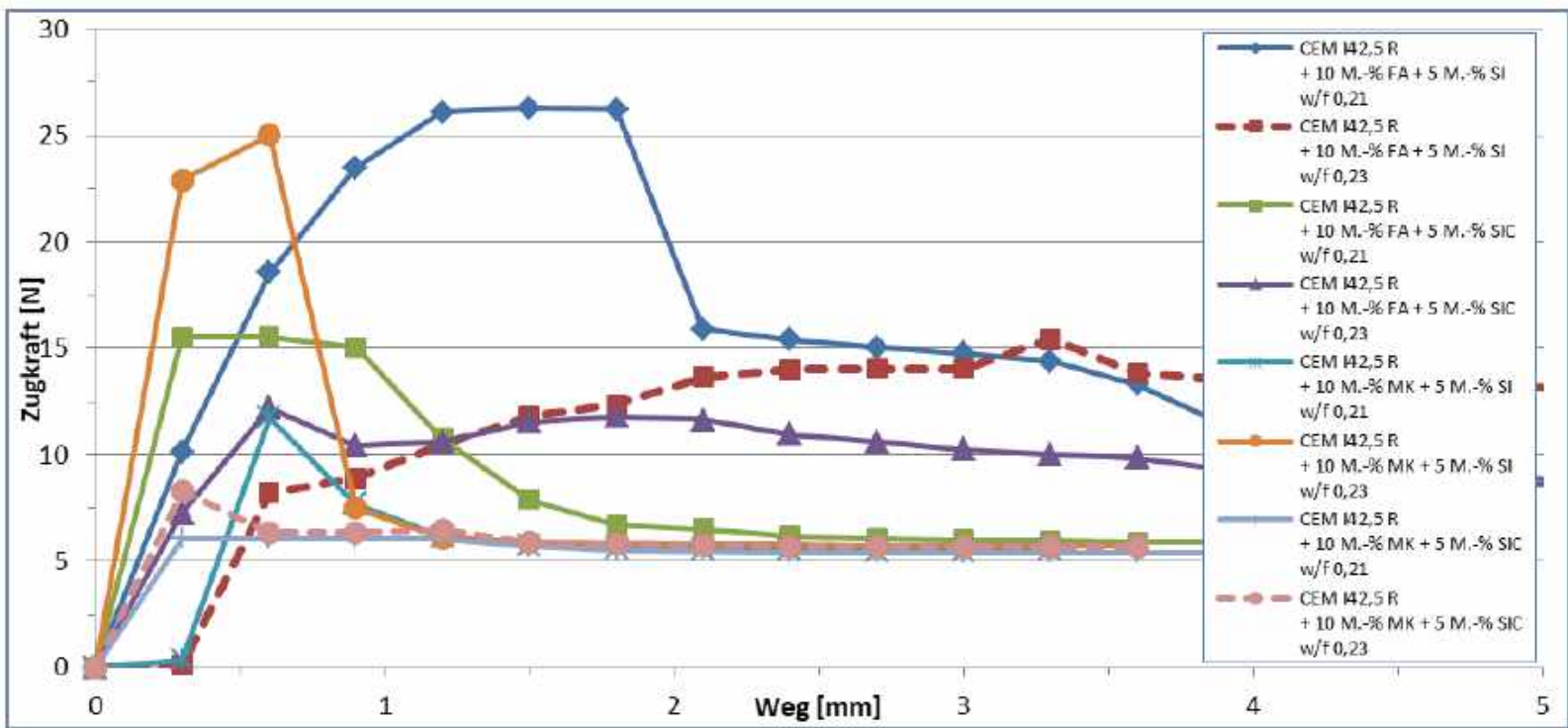


CEM III/A



w/f = 0,21 – alle Zemente

Resultate der Zugversuche



Mischung	CEM I42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SI w/f 0,21	CEM I42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SI w/f 0,23	CEM I42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f 0,21	CEM I42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f 0,23	CEM I42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SI w/f 0,21	CEM I42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SI w/f 0,23	CEM I42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f 0,21	CEM I42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f 0,23
w/f-Wert	0,21	0,23	0,21	0,23	0,21	0,23	0,21	0,23
Oberfläche im Pulver[cm ² /g]	5217	5217	5146	5146	5202	5202	5131	5131
Oberfläche im Leim								
O _L [cm ² /g]	4311	4241	4253	4184	4299	4229	4241	4172
Wasserfilmdicke [μ]	0,40	0,44	0,41	0,45	0,40	0,44	0,41	0,45
Max. Zugkraft [N]	26,30	15,45	15,55	12,20	11,75	25,02	6,05	8,30
Weg bei Max. Zugkraft [mm]	1,50	3,30	0,60	0,60	0,60	0,60	1,20	0,30
Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	18,55	8,2	15,55	12,2	11,75	25,02	6,05	6,3
Verdichtungsgrad [%]	96,54	98,6	97,44	98,81	93,53	95,93	91,38	95,25

Abbildung 131: CEM I mit je zwei Zusatzstoffen bei w/f-Werten von 0,21 und 0,23

Resultate der Zugversuche: Auswertung, Optimierung

Parameter für eine Optimierung:

1. Hohe Zugkraft bei geringen Dehnwegen
2. Maximale Zugkraft bei geringen Dehnwegen
3. Hoher Verdichtungsgrad
4. Hoher w/f-Wert

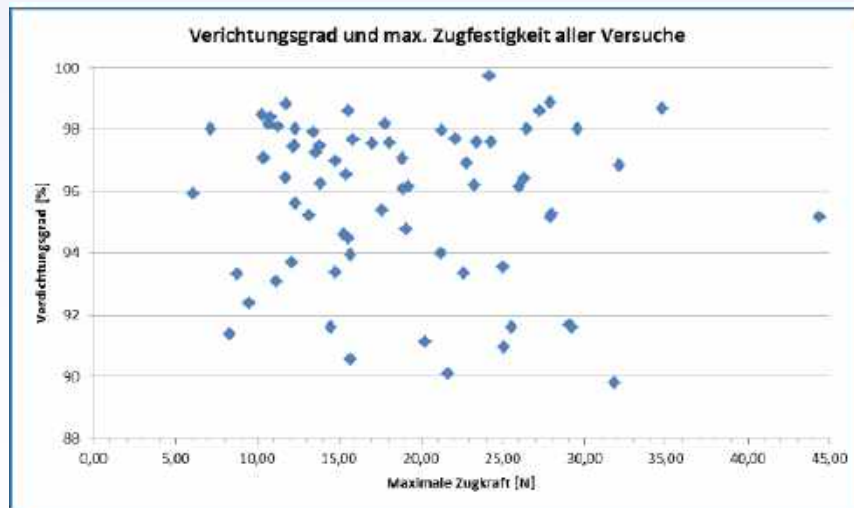


Abbildung 145: maximalen Zugkräfte in Abhängigkeit der erreichten Verdichtung

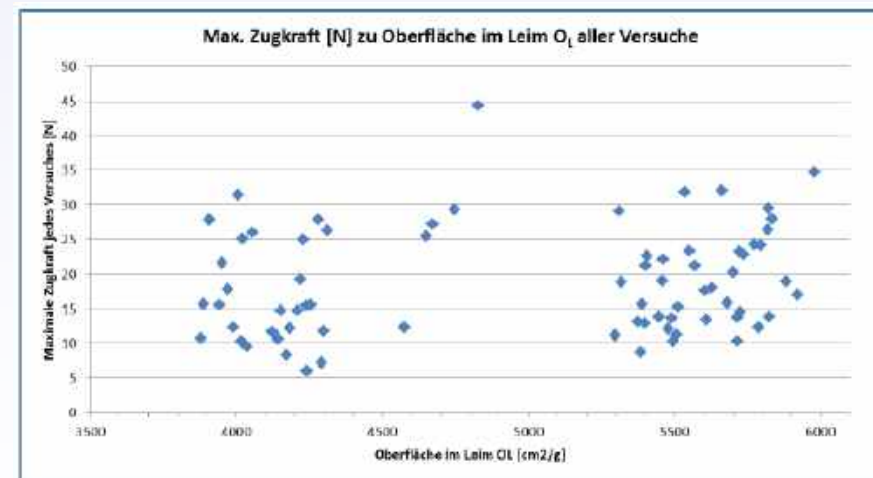
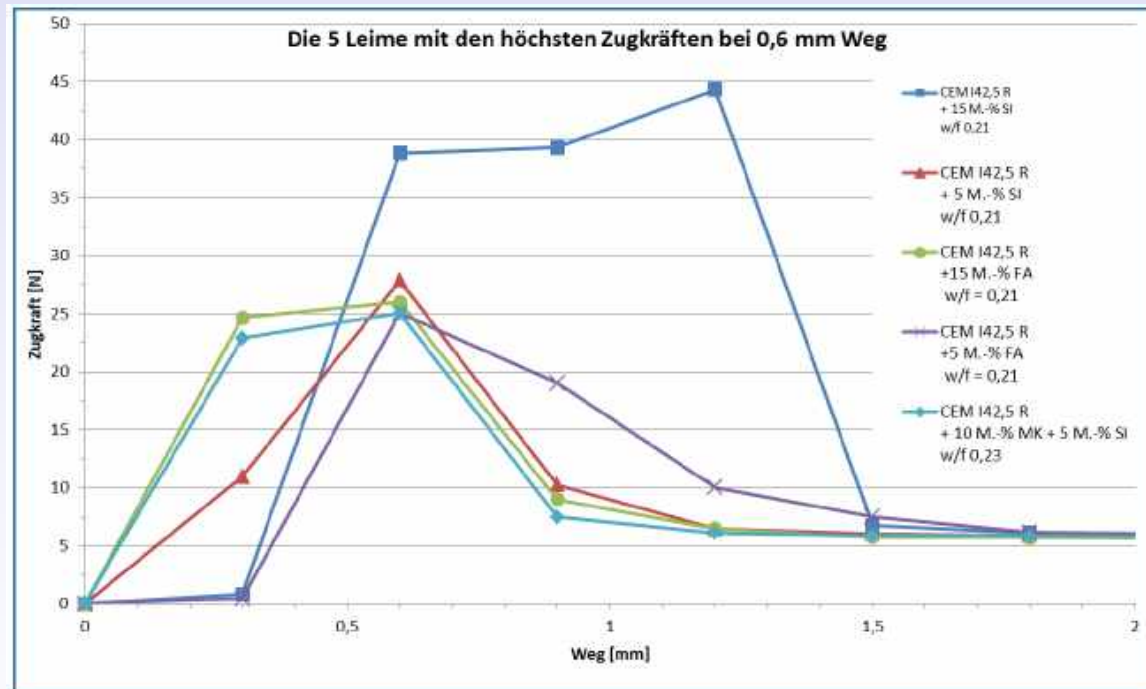


Abbildung 146: Maximalwerte der Zugkraft aller Versuche bei der jeweiligen Oberfläche im Leim

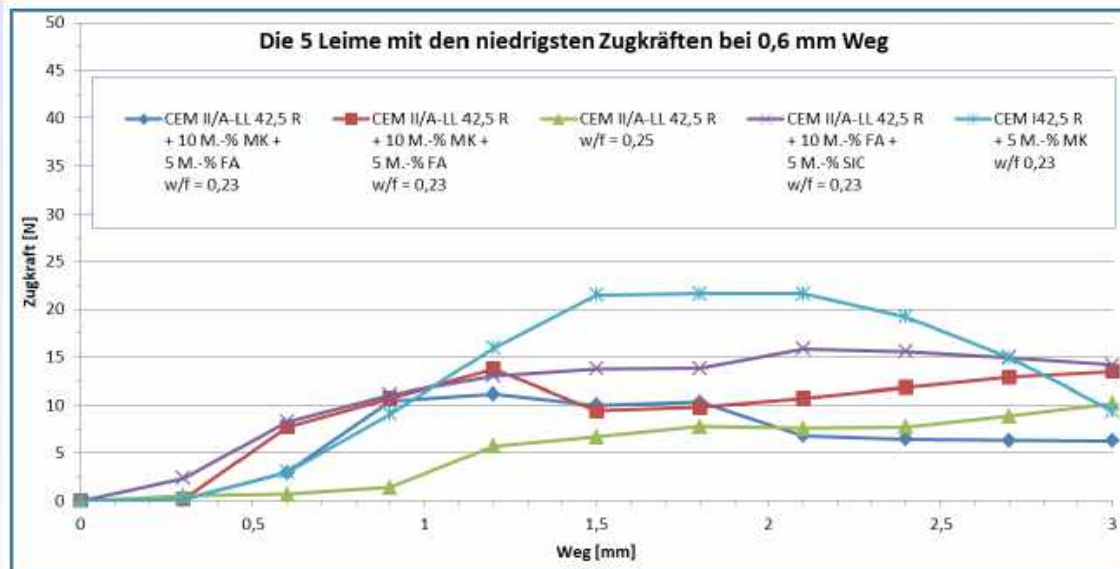
Resultate der Zugversuche: Auswertung, Optimierung



Mischung	w/f-Wert	Oberfläche im Pulver [cm ² /g]	Oberfläche im Leim O _L [cm ² /g]	Wasserfördere [μ]	Max. Zugkraft [N]	Weg bei Max. Zugkraft [mm]	Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	Verdichtungsgrad [%]
CEM I 42,5 R + 15 M.-% SI w/f 0,21	0,21	5839	4825	0,36	44,35	1,20	38,85	93,37
CEM I 42,5 R + 5 M.-% SI w/f 0,21	0,21	5177	4279	0,41	27,90	0,60	27,9	95,15
CEM I 42,5 R + 15 M.-% FA w/f = 0,21	0,21	4906	4054	0,43	26,00	0,60	26	95,60
CEM I 42,5 R + 5 M.-% FA w/f = 0,21	0,21	4866	4022	0,43	25,05	0,60	25,05	96,14
CEM I 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SI w/f 0,23	0,23	5202	4229	0,44	25,02	0,60	25,02	95,93

Abbildung 153: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den höchsten Zugkräften bei 0,6 mm Weg

Resultate der Zugversuche: Auswertung, Optimierung



Mischung	w/f-Wert	Oberfläche im Pulver [cm ² /g]	Oberfläche im Leim O _L [cm ² /g]	Wasserdicke [μ]	Max. Zugkraft [N]	Weg bei Max. Zugkraft [mm]	Zugkraft [N] bei 0,6 mm Weg	Verdichtungsgrad [%]
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% SIC w/f = 0,23	0,23	6512	5295	0,35	11,18	1,80	0,15	97,59
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% MK + 5 M.-% FA w/f = 0,23	0,23	7042	5725	0,33	14,50	4,50	0,2	93,32
CEM II/A-LL 42,5 R w/z = 0,25	0,25	7011	5609	0,36	13,45	4,80	0,7	98,08
CEM II/A-LL 42,5 R + 10 M.-% FA + 5 M.-% SIC w/f = 0,23	0,23	6986	5679	0,33	15,85	2,40	2,4	98,01
CEM II 42,5 R + 5 M.-% MK w/f 0,23	0,23	4859	3950	0,47	21,65	2,10	3	98,18

Abbildung 154: Verläufe und Kenndaten der Rezepturen mit den fünf niedrigsten Zugkräften bei 0,6 mm Weg

Resultate der Zugversuche: Auswertung, Optimierung

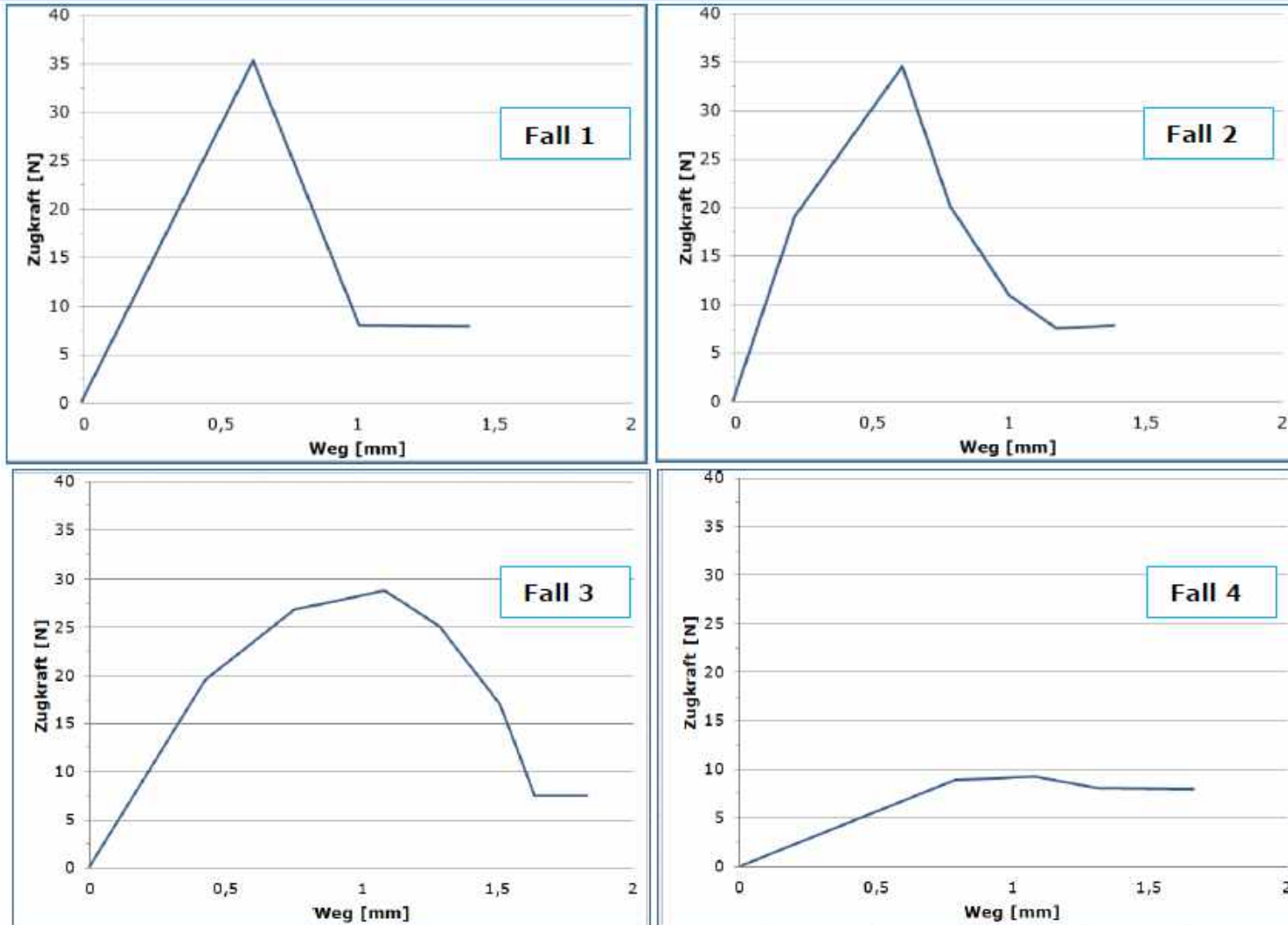



Abbildung 142: Qualitative Darstellung der Versagensarten erdfeuchter Zementleime im zentrischen Zugversuch

Zusammenfassung: Auswertung, Optimierung

Kurventyp	w/f	Z	V	Beurteilung	Auswirkung in der Produktion
	<	<	<	Zu trocken	Klebestellen, Gefü- schaden durch radiale Setzrisse  
	>	<	>	Kommt nicht vor	
	+/-	>	+/+	gut	Maßhaltig, formstabil

Zusammenfassung: Auswertung, Optimierung

Kurventyp	w/f	Z	V	Beurteilung	Auswirkung in der Produktion
	<	<	<	Zu trocken	Klebestellen, Gefügeschaden durch radiale Setzrisse  
	>	<	>	Kommt nicht vor	
	+/-	>	+/+	gut	Maßhaltig, formstabil
	<	>	<	CEM I, FA	Bauchige Produkte, Maßabweichungen 
	+/-	>	>	CEM II, III, (FA+SIC/ FA+SI)	

Zusammenfassung: Auswertung, Optimierung

Kurventyp	w/f	Z	V	Beurteilung	Auswirkung in der Produktion
	<	<	<	Zu trocken	Klebestellen, Gefüge- schaden durch radiale Setzrisse  
	>	<	>	Kommt nicht vor	
	+/-	>	+/+	gut	Maßhaltig, formstabil
	<	>	<	CEM I, FA	Bauchige Produkte, Maßabweichungen 
	+/-	>	>	CEM II, III, (FA+SIC/ FA+SI)	
	<	<	<	Zu trocken; MK, SI	Kollaps nach Transport: Z zu gering bei großen Verformungen 
	>	0	>	Zu feucht; SIC, MK, SI	Kollaps unmittelbar

Zugversuche an Beton: 8 mm GK, zwei w/z-Werte

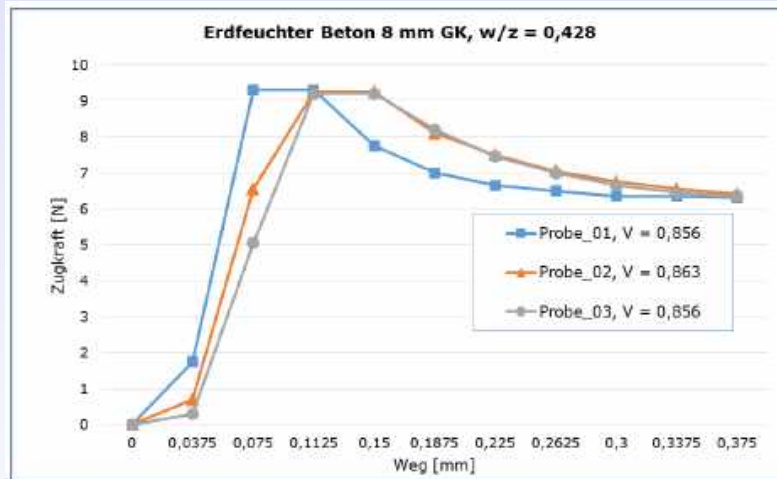


Abbildung 136: Zugkraft von drei Probekörpern aus einer Mischung erdfeuchten Betons mit w/z = 0,428

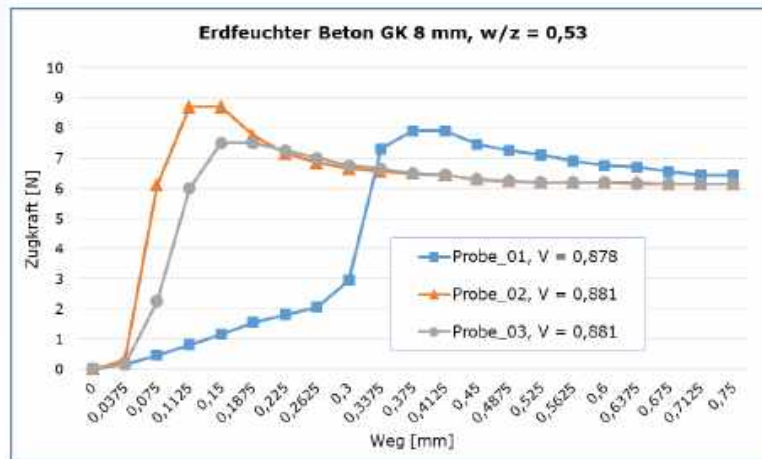
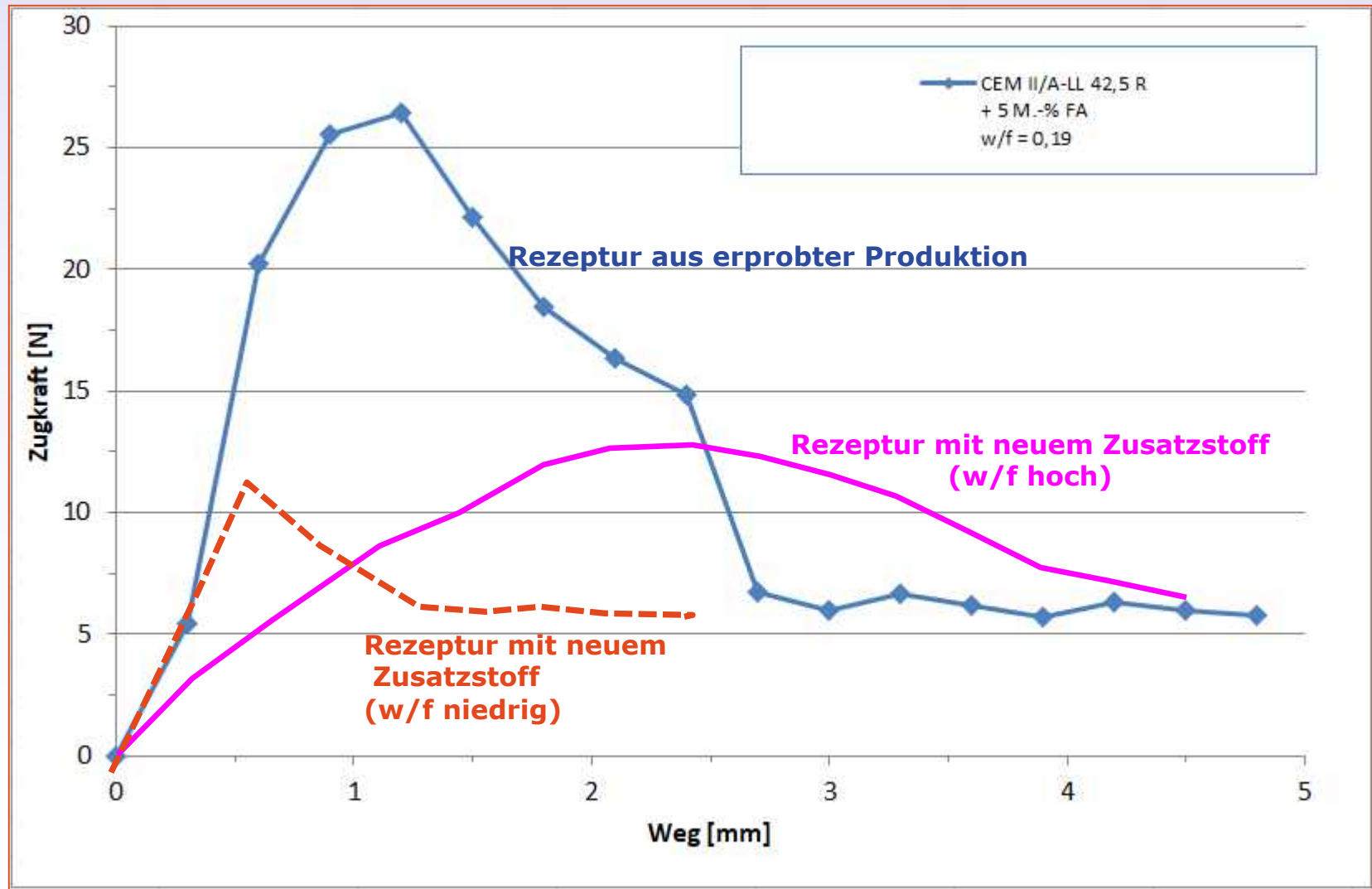


Abbildung 137: Zugkraft von drei Probekörpern aus einer Mischung erdfeuchten Betons mit w/z = 0,53

- Zugkräfte geringer als bei Leimen
- Verdichtungsgrade geringer
- Unterschiede geringer, jedoch feststellbar
- Hoher Verschleiß an Kunststoffformen
- Einfluss von Reibung und Verzahnung erkennbar an hohem Reinigungsaufwand

Zusammenfassung



Zusammenfassung

- **Theoretischen Haftkräfte werden stark von der Beschaffenheit der Oberfläche der Partikel dominiert und bestehen aus mehreren Komponenten**
- **Theoretische Vorhersage der Leimeigenschaften durch Einfluss der Ausgangsstoffe anhand der Versuche zur Zeit nicht möglich**
- **Unterschiede im Zug-Dehnungsverhalten von Zementleimen (und Beton) sind messbar**
- **Leime mit Siliziumcarbid und Metakaolin weisen geringere Zugkräfte auf**
- **Versagensarten der Zugdehnung lassen auf Frischbetonverhalten während der Verarbeitung (sofortige Entschalung) schließen**
- **Granulometrie der Feststoffe (Sieblinien, Oberfläche) korreliert nicht erkennbar mit den Messwerten**
- **Zugdehnung einer bestehenden Rezeptur kann mit der Zugdehnung einer neuen Rezeptur verglichen werden**
- **Prüfverfahren ist schnell, einfach und kostengünstig**

Ausblick



Ausblick

Mit neuer Versuchseinrichtung:

- **Zwischenzeitlich erkannte Fehlerquellen beseitigen:**
 - **Krafteinleitung, Formenzylinder mit geringerem Verschleiß, für drei Versuchssätze**
- **Je präziser das Verfahren, desto präziser die Unterscheidbarkeit von Mischungsvariationen**
- **Vergleichsuntersuchungen an Zementleimen mit verschiedenen Zementvariationen (Hersteller, Zementart, Festigkeitsklasse), Kenngröße für EF-Leime**
- **Erprobung an industriell verwendeten erdfeuchten Betonen: Größe der Probekörper, Eignung zur Beurteilung alternativer Ausgangsstoffe (Zemente, Zusatzstoffe, RC-Körnungen)**



**Ermittlung der Grünzugfestigkeit erdfeuchter
Zementleimgemische als Grundlage für die Optimierung der
Produktion von sofort entschalten Betonwaren**

**Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
01. Februar 2019**

