

# Diplomarbeit

MASTER THESIS

## Einfluss verschiedener Mikrosilika auf Frisch- und Festbetoneigenschaften von ultrahochfesten Betonen

ausgeführt am

**Institut für Hochbau und Technologie**

**Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und**

**Brandsicherheit**

der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

**Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr. techn. Elmer Bölcskey**

**Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer**

**Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner**

durch

**Birgit Zipfinger, B.Sc.**

Matr.Nr.: 1026115

Holzstraße 8

3363 Neufurth

Wien, am 19. Oktober 2017

## **Danksagung**

"Die akademische Freiheit ist die Freiheit, so viel lernen zu dürfen, wie man nur will."

- Rudolf Virchow

Mit diesem Zitat bedanke ich mich bei den Herren Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr. techn. Elmer Bölcskey, Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer und Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner für die Möglichkeit und die Unterstützung bei der Entstehung und Ausarbeitung meiner Diplomarbeit.

Weiter bedanke ich bei meinen Eltern Ingeborg und Erwin für die jahrelange Unterstützung, ohne die das Studium für mich nicht möglich gewesen wäre.

## **Kurzfassung**

Ultrahochfeste Betone werden bereits seit einigen Jahren für den Bau von Brücken und Hochhäuser verwendet. Die Frisch- und Festbetoneigenschaften hängen bei diesen Betonen stark von den verwendeten Stoffen, der Mischreihenfolge und den Nachbehandlungsmethoden ab. Diese Arbeit ergänzt die bereits bestehende Forschung und beschäftigt sich mit der Variation des Ausgangsmaterials. Bei festgelegter Rezeptur wird das Mikrosilika variiert. Durch die Verwendung verschiedener Mikrosilika sollen die Stärken und Schwächen der Mischungen aufgezeigt werden.

**Abstract**

Ultra-high strength concretes have been used for several years for the construction of bridges and high-rise buildings. The fresh and hardened concrete properties of these concretes depend heavily on the materials used, the mixing sequence and the post-treatment methods. This work complements the already existing research and deals with the variation of the raw material. The microsilica is varied according to a fixed recipe. The strengths and weaknesses of the mixtures are to be demonstrated by using different microsilicas.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen – Stand der Technik</b>	<b>9</b>
2.1	Zusammensetzung und Herstellung . . . . .	9
2.1.1	Definition . . . . .	9
2.1.2	Zusammensetzung, Mischung und Komponenten . . . . .	10
2.1.2.1	Zement . . . . .	10
2.1.2.2	Zuschlagstoffe . . . . .	12
2.1.2.3	Wasser . . . . .	12
2.1.2.4	Zusatzmittel . . . . .	13
2.1.2.5	Zusatzstoffe . . . . .	16
2.1.3	Mikrosilika . . . . .	17
2.1.4	Packungsdichte . . . . .	18
2.1.5	Wassermenge / Wasserbindemittelwert . . . . .	19
2.1.6	Rheologie . . . . .	21
2.1.7	Nachbehandlung . . . . .	24
2.2	Früh- und Festbetoneigenschaften von UHPC . . . . .	26
2.2.1	Frishbetoneigenschaften . . . . .	27
2.2.1.1	Ausbreitfließmaß . . . . .	28
2.2.1.2	Trichterauslaufzeit . . . . .	28
2.2.1.3	Bestimmung des dynamischen Fließmoments und der Viskosität . . . . .	29
2.2.1.4	Luftgehalt . . . . .	29
2.2.1.5	Bestimmung der Rohdichte . . . . .	30
2.2.2	Festbetoneigenschaften . . . . .	30
2.2.2.1	Biegezugfestigkeit . . . . .	31
2.2.2.2	Druckfestigkeit . . . . .	31
2.2.2.3	Rohdichte von Festbeton . . . . .	32
2.3	Mischprozess . . . . .	32
2.3.1	Allgemeines . . . . .	32
2.3.2	Mischarten . . . . .	34
2.3.3	Entmischen . . . . .	36
2.3.4	Arten von Mischern . . . . .	36
2.3.4.1	Freifallmischer . . . . .	37

2.3.4.2	Zwangsmischer . . . . .	37
2.3.4.3	Eirich-Intensivmischer . . . . .	38
2.3.4.4	Eirich Intensivmischer mit Vakuumeinrichtung . . . . .	39
2.4	Globally Harmonized Systems (GHS) . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Ausgangsstoffe und Versuchsdurchführung</b>	<b>43</b>
3.1	Verwendete Produkte und Gefahrenpotentiale . . . . .	43
3.1.1	Zement . . . . .	43
3.1.2	Mikrosilika . . . . .	44
3.1.2.1	"940" . . . . .	44
3.1.2.2	"971" . . . . .	44
3.1.2.3	Microwhite . . . . .	45
3.1.2.4	Slurry . . . . .	45
3.1.2.5	Mapei . . . . .	45
3.1.2.6	Sika . . . . .	46
3.1.2.7	Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften der einzelnen Mikrosilika	46
3.1.3	Fließmittel . . . . .	46
3.1.4	Konsistenzhalter . . . . .	46
3.1.5	Entlüfter . . . . .	47
3.1.6	Quarzmehl . . . . .	47
3.1.7	Quarzsand . . . . .	47
3.2	Rezeptur . . . . .	47
3.3	Standard Mischreihenfolge . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Versuche und Auswertung</b>	<b>50</b>
4.1	Partikelgrößenverteilung . . . . .	50
4.2	Packungsdichte . . . . .	57
4.3	Mischleistung und Stabilisationszeit . . . . .	60
4.3.1	Vergleich innerhalb jeder Mischung . . . . .	62
4.3.2	Vergleich und Interpretation . . . . .	66
4.4	Frischbetoneigenschaften . . . . .	69
4.4.1	Frischbetontemperatur . . . . .	69
4.4.2	Ausbreitmaß . . . . .	70
4.4.3	Trichterauslaufzeit . . . . .	71
4.4.4	Frischbetonluftgehalt . . . . .	71

4.4.5	Frischbetonrohddichte . . . . .	72
4.4.6	Vergleich und Interpretation . . . . .	73
4.5	Rheologische Eigenschaften . . . . .	74
4.6	Festbetoneigenschaften . . . . .	80
4.6.1	Biegezugfestigkeit . . . . .	80
4.6.2	Druckfestigkeit . . . . .	83
4.6.3	Festbetonrohddichte . . . . .	84
4.6.4	Interpretation . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>92</b>

## **1 Einleitung**

Bei der Herstellung von ultrahochfesten Betonen werden Mikrosilika als Zusatzstoffe eingesetzt um ein dichtes Gefüge und im Weiteren eine hohe Festigkeit zu erzielen. Bei Versuchen im Labor zeigt sich, dass die Eigenschaften bei gleichbleibender Rezeptur, je nach Hersteller des Mikrosilikas, teilweise stark abweichen. Dabei zeigen sich nicht nur Abweichungen bei der Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Die notwendige Mischarbeit und Mischdauer für die Herstellung des Frischbetons sowie die erreichbaren Festigkeiten schwanken ebenso. Die Unterschiede bei der Verwendung verschiedener Mikrosilika konnte bisher noch nicht geklärt werden.

Als Ziel dieser Arbeit sollen die Unterschiede in den Frisch- und Festbetoneigenschaften bei Verwendung verschiedener Mikrosilika aufgezeigt werden. Für die Versuche wird ein Rezept mit festgelegter Mischreihenfolge herangezogen, bei welchem die verschiedenen Mikrosilika die einzige Variable darstellen. Ein besonderes Augenmerk soll auf die Verarbeitbarkeit und auf die Wiederholbarkeit der Mess- und Prüfergebnisse gelegt werden.

In dieser Arbeit wird in Kapitel 2 auf die wichtigsten Grundlagen für die Zusammensetzung, die Herstellung und die Prüfung der Früh- und Festbetoneigenschaften von ultrahochfesten Betonen eingegangen. Die theoretische Grundlage für die Einstufung und Kennzeichnung von Gefahrenstoffen schließt dieses Kapitel ab. In Kapitel 3 wird genauer auf die verwendeten Stoffe und deren Korngrößenverteilung eingegangen. Nach der Beschreibung der verwendeten Rezeptur und der Mischreihenfolge wird in Kapitel 4 auf die Auswertung der gesammelten Prüf- und Messwerte eingegangen. Betrachtete Werte sind die Mischleistung, die Stabilisationszeit, die Frischbetontemperatur, die Trichterauslaufzeit, der Luftgehalt, die Frischbetonrohddichte sowie das dynamische Fließmoment und die Steigung der Fließgeraden. Die Biegezug- und Druckfestigkeit wird über die Dauer von 56 Tagen betrachtet. In der Zusammenfassung werden die Prüfergebnisse gegenübergestellt, interpretiert und ein Ausblick für weitere Versuche gegeben.

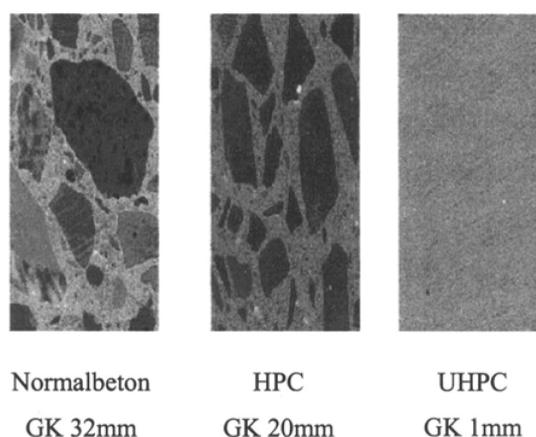
## 2 Grundlagen – Stand der Technik

### 2.1 Zusammensetzung und Herstellung

#### 2.1.1 Definition

Als ultrahochfeste Betone bezeichnet man Betone, welche eine Betondruckfestigkeit von  $150 \text{ N/mm}^2$  überschreiten. Merkmale dieser Betone sind neben den hohen Druckfestigkeiten die Verwendung von sehr feinen Zuschlägen und ein Wasser/Bindemittelwert, der niedriger als bei Normalbetonen ist. Zusätzlich werden ultrahochfesten Betonen oft Fasern zugegeben, um die Festigkeitseigenschaften noch weiter zu erhöhen [1].

Einen Vergleich der Mikrostruktur zwischen Normalbeton, HPC (High Performance Concrete) und UHPC (Ultra High Performance Concrete) zeigt Abb. 2.1. Es ist zu erkennen, dass das Größtkorn bei gewünschter steigender Festigkeit immer kleiner gewählt wird.



**Abb. 2.1:** Vergleich der Mikrostruktur von Normalbeton, HPC und UHPC [1]

Durch die Verringerung des Größtkorndurchmessers und die Wahl der passenden Ausgangsstoffe kommt es sowohl zu einer Reduktion der Poren als auch zur Reduktion der Gefügestörungen. Dies führt im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Festigkeiten. Ein weiterer positiver Effekt der verringerten Korndurchmesser ergibt sich im Zusammenhang mit dem Verformungsverhalten der Gesteinskörnungen und dem Zementleim. Bei Normalbeton treten Spannungsspitzen im Verbundbereich zwischen den beiden Komponenten auf und es kommt zu Rissbildung und Versagen. Dieser Effekt kann durch die feinere Gesteinskörnung, welche bei UHPC zur Verwendung kommt, reduziert werden [2].

### 2.1.2 Zusammensetzung, Mischung und Komponenten

Beton kann als ein Dreistoffsystem aus Zement, Zuschlagsstoffen und Wasser beschrieben werden. Bei der Herstellung von ultrahochfestem Beton wird dieses Dreistoffsystem auf ein Fünfstoffsystem erweitert. Durch die Beimengung von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen wird die Herstellung eines Betons ermöglicht, welcher bei einem geringeren Wasser/Bindemittelwert gute Verarbeitungseigenschaften, eine höhere Dauerhaftigkeit und Festigkeiten über  $150 \text{ N/mm}^2$  aufweisen.

#### 2.1.2.1 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, welches nach dem Anmachen mit Wasser durch eine chemische Reaktion erstarrt und erhärtet. Nach dem Erhärten bleibt der Stoff auch unter Wasser fest und Raumbeständig. Zement ist anorganisch, fein gemahlen und wird für die Herstellung von Beton und Mörtel verwendet. Der wesentliche Zweck besteht im Verbinden der Zuschläge bzw. der Gesteinskörnungen zu einem Baustoff.

Geschichtlich lässt sich die Entstehungsgeschichte von Zement bis zu den Römern zurückverfolgen. Diese stellten bereits betonartige Mauerwerke aus Bruchsteinen mit einem Bindemittel aus gebranntem Kalk her, welches sie "opus caementitium" nannten. Dem Bindemittel wurden vulkanische Asche und Ziegelmehl zugesetzt, um hydraulische Eigenschaften zu erzielen. Unter der Bezeichnung "Portlandzement" wurde im Jahre 1824 ein Patent von *Joseph Aspdin* angemeldet. Dabei handelte es sich um ein Bindemittel, welches durch Brennen einer künstlichen Mischung von Ton, Kalk und Mergel hergestellt wurde [3]. Durch Brennen dieser Stoffe entsteht Zementklinker. Als wesentlichen Bestandteile von Zementklinker sind Tricalciumsilicat, Dicalciumsilicat, Tricalciumaluminat und Calciumaluminatferrit zu nennen. Bei der Herstellung entstehen durch Sintern eines Stoffgemisches aus Calciumoxid  $\text{CaO}$ , Siliciumoxid (Kieselsäure)  $\text{SiO}_2$ , Aluminiumoxid (Tonerde)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Eisenoxid  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  die sogenannten Klinkerphasen, welche in Tab. 2.1 dargestellt werden [3].

Jede der Klinkerphasen beeinflusst die Eigenschaften des Zements. Alit ( $\text{C}_3\text{S}$ ) trägt beispielsweise zu einer schnellen Erhärtung, einer hohen Hydratationswärme und einer hohen Festigkeit bei. Eine schnelle Reaktion mit  $\text{H}_2\text{O}$ , eine hohe Hydratationswärme sowie eine geringe Festigkeit und eine Anfälligkeit gegen Sulfatwasser wird durch Aluminat begünstigt. Freikalk und Periklas sind unerwünschte Begleitelemente, welche bei zu hohen Konzentrationen zum Treiben des Betons führen [4].

Die hydraulischen Eigenschaften des Zements beruhen im wesentlichen auf dem Tricalciumsilicat. Werden für die Herstellung reine Rohstoffe, wie z.B. reiner Kalkstein und reiner Quarzsand verwendet, ist eine sehr hohe Mahlfineinheit und eine Brenntemperatur über  $1500^\circ\text{C}$  notwendig.

**Tab. 2.1:** Phasenzusammensetzung deutscher Zementklinker [3]

Klinkerphasen		Chemische Formel	Kurzbezeichnung	Gehalt in M.-%
Tricalciumsilicat	Alit	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$	52 - 85
Dicalciumsilicat	Belit	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$	0,2 - 27
Calciumaluminatferrit	Aluminatferrit	$2CaO \cdot (Al_2O_3, Fe_2O_3)$	$C_2(A, F)$	4 - 16
Tricalciumaluminat	Aluminat	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$	7 - 16
freies $CaO$	Freikalk [4]	$CaO$	-	0,1 - 5,6
$MgO$ , gesamt	Periklas [4]	$MgO$	-	0,7 - 4,5

In der Praxis verwendet man Rohstoffe, welche zusätzlich zu  $CaO$  und  $SiO_2$  noch  $Al_2O$  und  $Fe_2O_3$  enthalten. Diese zusätzlichen Bestandteile fördern die Bildung des Tricalciumsilicats in der Schmelze. Die Brenntemperatur kann danach auf 1350 - 1500°C verringert werden. Weiter kann die Mahlfeinheit reduziert werden, was die Verwendung günstiger Rohstoffe möglich macht. Die Herstellung des Zementklinkers erfolgt überwiegend in Drehöfen [3].

Nach der Herstellung des Zementklinkers wird dieser unter Zugabe von Hüttensand, Puzzolan, Ölschieferasche, Flugasche und / oder Füller gemahlen. Dafür kommen hauptsächlich Kugelmöhlen zum Einsatz. Eine höhere Festigkeit des Klinkers (hoher  $C_3S$ -Anteil) führt dazu, dass der Energieaufwand für den Mahlprozess steigt. Als Maß der Mahlfeinheit des Zements wird meist die massenbezogene Oberfläche nach *Blaine* (siehe auch ÖNORM EN 196-6:1017 05 15) mit einem Feinheitsmerkmal, wie beispielsweise die Anteile bestimmter Korngrößenfraktionen, angegeben.

Für die Herstellung von Ultra High Performance Concrete wird meist ein  $C_3A$  freier Zement gefordert. Dieser sorgt für eine geringe Wärmeentwicklung und weist eine gute Verarbeitbarkeit, einen geringen Wasserbedarf und eine gute Nacherhärtung auf [4]. Im Rahmen der Versuche dieser Arbeit wird  $C_3A$ -freier Portlandzement CEM I 52,5 herangezogen. Tabelle 2.2 zeigt die Eigenschaften von Zement der Festigkeitsklasse 52,5 N nach [5].

**Tab. 2.2:** Mechanische und physikalische Anforderungen an Zement mit der Festigkeitsklasse 52,5 N nach ÖNORM EN 197-1 [5]

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit in MPa		Erstarrungsbeginn in Minuten	Raumbeständigkeit (Dehnungsmaß) in mm
	Anfangsfestigkeit	Normalfestigkeit		
	2 Tage	28 Tage		
52,5 N	$\geq 20$	$\geq 52.5$	$\geq 45$	$\leq 10$

### 2.1.2.2 Zuschlagstoffe

Als Zuschlagstoffe werden natürliche und künstliche Gesteinskörnungen bezeichnet, welche dem Beton beigemischt werden. Die Qualität des Zuschlages bestimmt gemeinsam mit der Festigkeit des Zementleims die Festigkeit des Betons. Die Anforderungen an die Zuschlagstoffe können sich an die Kornform, den Widerstand gegen Frost und den Gehalt an schädlichen Bestandteilen richten. Daraus ergeben sich für speziellen Anforderungen besondere Zuschläge, zum Beispiel bei einem notwendigen Widerstand gegen Verschleißbeanspruchung. Sind in den Zuschlagstoffen anorganische Beimengungen wie Gips oder Schwefelverbindungen vorhanden, kann die Erhärtung des Zementleims negativ beeinflusst werden [6].

Im Fall von ultrahochfesten Betonen mit einer Druckfestigkeit über  $150 \text{ N/mm}^2$  ist es daher zwingend notwendig, für die Produktion Zuschlagstoffe heranzuziehen, die für die entsprechende Belastung geeignet sind. Zur Verwendung kommen hauptsächlich Quarzsande, da diese eine hohe Gesteinsfestigkeit aufweisen und leicht verfügbar sind. Beim Erhärten bildet sich zwischen dem Gesteinskorn und der Bindemittelmatrix eine dichte und feste Übergangszone aus [7].

Für ultrahochfeste Betone wird ein Größtkorn mit einem Durchmesser von 0,4 mm empfohlen. Dieser maximale Durchmesser soll eine gute Verarbeitbarkeit gewährleisten sowie den Luftporengehalt des Frischbetons gering halten. Eine runde Kornform unterstützt die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons, deshalb sind diese gegenüber gebrochenen Sanden zu bevorzugen [7].

### 2.1.2.3 Wasser

Zugabewasser, Feuchtigkeit, die an der Oberfläche des Zuschlages haftet, Wasser aus Zusatzmitteln und -stoffen sowie Wasser, welches in Form von Dampf oder Eis beigemischt wird, bilden den Gesamtwassergehalt des Betons [8].

Das Wasser dient im Beton als "Gleitmittel" um den Reibungswiderstand zwischen den Gesteinskörnungen und den Zementteilchen zu verringern und die Verdichtung zu begünstigen. Zusätzlich ist für die Hydratation des Zements eine ausreichende Wassermenge erforderlich [9].

Zur Verwendung im Beton kann jedes in der Natur vorkommende Wasser verwendet werden, wenn es keine Bestandteile enthält, welche die Erhärtung des Zementleims beeinträchtigen oder den Zementstein angreifen [8]. Als Anforderung an die Betonverträglichkeit des Zugabewassers definiert *Springenschmied* [10] folgende Kriterien:

- das Wasser darf das **Erstarren und Erhärten** des Zements nicht nachteilig verändern
- es darf zu keiner ungünstigen Beeinflussung der **Wirkung von Zusatzmitteln** kommen

- die **Raubeständigkeit des Zements** darf nicht beeinträchtigt werden
- der **Korrosionsschutz der Stahlbewehrung** muss gewährleistet sein.

Der Wasseranspruch ist von der gewünschten Konsistenz und der Kornzusammensetzung abhängig, so steigt der Wasseranspruch mit steigender spezifischer Oberfläche der Körnung und des Zements. Entsprechend wirken sich ein hoher Mehlkorngelalt bzw. Füller sowie gebrochene Körnungen in einem höheren Wasserbedarf aus.

#### 2.1.2.4 Zusatzmittel

Nach EN 206 [11] sind Betonzusatzmittel Stoffe, welche während des Mischvorganges dem Beton in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben werden, um die Eigenschaften des Frisch- oder Festbetons zu verändern. Als empfohlene Höchstdosierung werden 50 g/kg genannt. Tab. 2.3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Betonzusatzmittel.

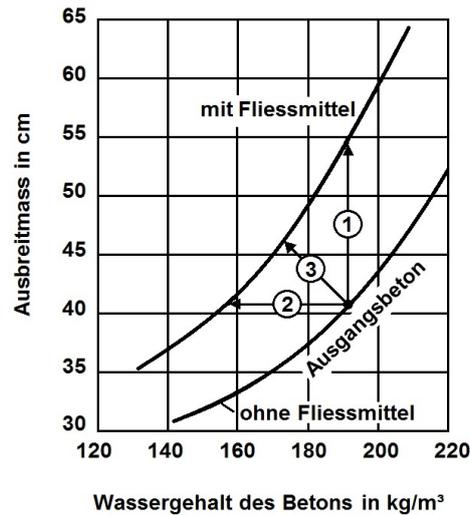
**Tab. 2.3:** Betonzusatzmittel [9]

Wirkungsgruppe	Kurzzeichen	Farbkennzeichen
Betonverflüssiger	BV	gelb
Fließmittel	FM	grau
Luftporenbildner	LP	blau
Dichtungsmittel	DM	braun
Verzögerer	VZ	rot
Beschleuniger	BE	grün
Einpresshilfen	EH	weiß
Stabilisierer	ST	violett
Chromatreduzierer	CR	rosa
Recyclinghilfen	RH	schwarz

**Betonverflüssiger (BV)** sowie Fließmittel erniedrigen die Viskosität des Zementleims [12]. Betonverflüssiger verbessern einerseits die Verarbeitbarkeit des Betons bei gleichem W/Z-Wert bzw. W/B-Wert und vermindern andererseits den W/Z-Wertes bei gleicher Verarbeitbarkeit. Bei der Reduktion des W/Z-Wertes unter Verringerung der Wasserzugabe bei gleichem Zementgehalt ergibt sich eine Erhöhung der Festigkeit, Dichtigkeit und Widerstandsfähigkeit. Behält man den W/Z-Wert bei und reduziert man den Zementgehalt, verwendet aber einen Betonverflüssiger,

kann die Rissgefahr bei Massenbeton durch die geringere Wärmeentwicklung reduziert werden [9].

**Fließmittel (FM)** zählen zu den Betonverflüssigern. Sie bedienen sich der selben Wirkungsmechanismen wie Betonverflüssiger, zeigen jedoch eine zwei- bis dreimal stärkere Wirkung durch den Einsatz anderer Wirkstoffe [9].



**Abb. 2.2:** Wirkung von Fließmitteln [12]

In Abb. 2.2 sind die Effekte der Fließmittelzugabe auf das Ausbreitmaß dargestellt. Der Pfeil Nr. 1 zeigt eine Verflüssigung des Betons und damit eine Vergrößerung des Ausbreitmaßes bei gleichem W/Z-Wert, wodurch sich eine bessere Verarbeitbarkeit ergibt. Der Pfeil Nr. 2 zeigt die Reduktion des Wassergehaltes bei gleichbleibender Konsistenz. Diese Reduktion führt zu besseren Festbetoneigenschaften. Der Pfeil Nr. 3 zeigt eine Kombination beider Möglichkeiten. Es ergibt sich eine bessere Konsistenz und somit eine bessere Verarbeitbarkeit bei verbesserten Festbetoneigenschaften.

Die Wirkung von Betonverflüssigern und Fließmittel im Beton kann auf folgende Faktoren zurückgeführt werden [12]:

- Herabsetzung der Oberflächenspannung, Steigerung des Benetzungsvermögens
- Grenzflächeninteraktion
- Veränderung des Hydratationsverhaltens.

**Luftporenbildner (LP)** dienen in erster Linie dazu, den Frostwiderstand des Betons zu

erhöhen. Während des Mischens werden kleine, gleichmäßig verteilte Luftporen in den Frischbeton eingebracht, dadurch ergibt sich eine bessere Verarbeitbarkeit und der Wasseranspruch sinkt. Weiter kann durch LP der Mehlkorngelalt des Betons verringert werden [9].

Die Wirkung auf die Frostbeständigkeit ergibt sich aufgrund der Luftporen in denen die Spannungen des gefrierenden Porenwassers, welche sich in Kapilarporen bilden, abbauen können. Beim Gefrieren des Wassers vergrößert sich das Volumen um ca. 9 Vol. - % und drückt auf den Zementstein. Durch die Luftporen, welche in etwa die zehnfache Größe der Kapilarporen besitzen, kann sich das Porenwasser ohne Schaden für den Beton ausdehnen [12].

**Dichtungsmittel (DM)** erhöht die Wasserundurchlässigkeit von Festbetonen. Die Dichtigkeit ist dabei vom W/Z-Wert und der Nachbehandlung abhängig. Die Ursache des Feuchte- bzw. Wassertransports durch den Beton liegt im Kapillarsystem, welches die Poren verbindet und den gesamten Bauteil durchzieht. Durch den Zusatz von Dichtungsmittel verringern sich die kapillare Wasseraufnahme von Festbeton, indem sie das Eindringen des Wassers verhindert. Zum Einsatz kommen grenzflächenaktive Substanzen, die eine Wasserabweisende Wirkung erzielen [9], [12].

**Verzögerer (VZ)** verlängern die Zeit vom Beginn des Übergangs des Frischbetons vom plastischen in den feste Zustand, was zu einer verlängerten Verarbeitungszeit führt, dabei wird das Erstarren des Betons bei normalen Temperaturen unter der Verwendung von Normzement um ca. zwei bis drei Stunden verzögert. Durch die Verzögerung des Erstarrungsprozesses läuft auch die Wärmeentwicklung der Hydratation verzögert ab, dies kann sich bei der Herstellung von Massenbeton günstig auswirken. Ein Einfluss auf die 28-Tage-Druckfestigkeit besteht nicht [9].

Folgende Faktoren beeinflussen die Wirkung von Erstarrungsverzögerern [12]:

- Zementart
- W/Z-Wert
- Temperatur
- Dosierung.

**Beschleuniger (BE)** werden zum Zwecke des schnellen Baufortschritts eingesetzt bzw. aus bautechnischen Überlegungen heraus. Diese Zusatzmittel werden in Erstarrungsbeschleuniger und Erhärtungsbeschleuniger unterteilt. Dabei wirken Erstarrungsbeschleuniger verkürzend auf die Zeit beim Übergang vom plastischen in den festen Zustand, Erhärtungsbeschleuniger dagegen beschleunigen das auftreten der Frühfestigkeit [12].

**Einpresshilfen (EH)** dienen zur Verbesserung der Eigenschaften von Einpressmörtel für Spannkanäle im Spannbetonbau. Dabei soll eine geringe Absetzneigung, ein erstarrungsverzögernder Effekt und das Quellen nach dem Einpressen erzielt werden [12].

**Stabilisierer (ST)** werden verwendet, um die Neigung zum Bluten des Betons zu verringern. Dabei wird durch die Bildung langer Molekülketten im Anmachwasser die innere Reibung verringert. Das Einsatzgebiet reicht von Leichtbeton, bei welchem das Aufschwimmen der leichten Körnung verhindert werden soll, bis zu Pumpbeton, bei dem die Pumpfähigkeit verbessert werden soll [9].

**Chromatreduzierer (CR)** werden eingesetzt, wenn die Verarbeitung von Mörteln oder Betonen mit direktem Hautkontakt erfolgt. Dabei werden hautschädliche Chromanteile, die Chromatekzeme hervorrufen können, chemisch in unwirksame bzw. in nicht schädliche Verbindungen überführt [9].

**Recyclinghilfen (RH)** dienen dazu, die längere Verwendbarkeit von Waschwasser für die Reinigung von Mischern und Behälter zum Transport von Beton zu gewährleisten [9].

#### 2.1.2.5 Zusatzstoffe

Nach der *ÖNORM EN 206* [11] werden Betonzusatzstoffe als fein verteilte, anorganische Stoffe, welche im Beton verwendet werden um bestimmte Eigenschaften zu erreichen oder zu verbessern definiert. Die Einteilung erfolgt in zwei Gruppen bzw. Typen. Typ-I-Zusatzstoffe sind nahezu hydraulisch inaktive (inerte) Zusatzstoffe, Typ-II-Zusatzstoffe sind puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe. Als Zusatzstoffe vom Typ I gelten Füller nach EN 12620 oder EN 13055 und Pigmente nach EN 12878. Dem Typ II der Zusatzstoffe werden Flugasche nach EN 450-1, Silikatstaub nach EN 13263-1 und Hüttensandmehl nach EN 15167-1 zugeordnet.

Die Wirkung inerter Zusatzstoffe beruht auf der Veränderung der Kornzusammensetzung des Frisch- und Festbetons. Es finden keine chemischen oder mineralogischen Reaktionen mit anderen Bestandteilen des Betons statt. Inerte Zusatzstoffe können zu einer höheren Packungsdichte und zur besseren Verarbeitbarkeit beitragen. Reaktive Zusatzstoffe wirken zusätzlich zum Einfluss auf die granulometrische Zusammensetzung auf die Festigkeit des Gefüges durch die Bildung von Reaktionsprodukten und erhöhen dadurch die Dichte des Festbetons [13].

Als **Füller** wird nach *EN 12620* [14] jene Gesteinskörnung bezeichnet, die überwiegend durch

das 0,063-mm-Sieb hindurchgeht.

**Pigmente** sind Stoffe (feine Teilchen), die im Anwendungsmedium unlöslich sind und die zum Einfärben von zement- und / oder kalkgebundenen Baustoffen dienen [15].

Nach *Kirnbauer* [7] ist **Silikatstaub** der am häufigsten verwendete Zusatzstoff bei der Herstellung von UHPC. Silicatstaub, auch Mikrosilika oder Silica genannt, ist ein Nebenprodukt bei der Siliciumherstellung. Die Herstellung von Reinsilicium und Siliciumlegierungen erfolgt im elektrischen Lichtbogenofen. Silicatstaub, der aus feinen, glasig-kugeligen Partikeln mit einer mittleren Größe von 0,1 bis 0,2  $\mu\text{m}$  besteht, wird bei der Abgasreinigung gewonnen. Neben einem  $\text{SiO}_2$ -Anteil von mindestens 85 % weist der Silicatstaub noch Stoffe wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  und Ruß auf. Aufgrund des  $\text{SiO}_2$  Anteils wirkt Silicatstaub einerseits puzzolan, welches während der Zementhydratation, mit dem entstehenden Calciumhydroxid, Calciumsilicathydrate bildet. Aufgrund der Partikelgröße des Silicatstaubes wirkt er andererseits als Füller und sorgt für eine Verringerung des Porenvolumens und einer Veränderung der Mikrostruktur in der Kontaktzone Zementstein und Zuschlag. Weiters verbessern Mikrosilika durch die kugelige Form die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons. Silicatstaub wird pulverförmig und als Suspension verwendet [16], [7].

**Flugasche** ist ein feinkörniger, hauptsächlich aus kugelförmigen, glasigen Partikeln bestehender Staub, der bei der Verbrennung fein gemahlener Kohle anfällt. Flugasche besitzt puzzolanische Eigenschaften hat und besteht im Wesentlichen aus  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Die Herstellung erfolgt durch mechanische oder elektrostatische Abscheidung staubartiger Partikel bei Rauchgasen von Feuerungsanlagen [17].

**Hüttensandmehl** wird durch mahlen von Hüttensand hergestellt. Hüttensand ist ein glasartiges Material, das bei der raschen Abkühlung der Schlackenschmelze beim Hochofenprozess entsteht [18].

### 2.1.3 Mikrosilika

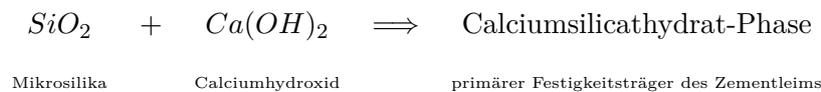
Da diese Arbeit vom Einfluss verschiedener Mikrosilika auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften handelt, wird auf den Zusatzstoff Mikrosilika vertieft eingegangen. Für die Gewinnung von Siliciummetallen und Siliciummetalllegierungen wird Quarz und Kohle gemeinsam in Elektroöfen bei ca. 2500 – 2800 °C geschmolzen. Beim Abstechen der Schmelze oxidiert in den oberen

kühleren Schichten das Silicium-Metall zu gasförmigem Siliciumoxid. Durch weiteres Abkühlen bildet sich durch Kondensation Siliciumdioxid welches der Abluft durch Filtern entzogen wird. Durch die rasche Abkühlung kommt es zu keiner Ausrichtung in ein geordnetes Kristallgitter. Es entsteht eine amorphe und regellose Struktur und die Mikrosilikapartikel formen sich zu einer fast perfekten Kugelform [4].

Die Partikelgrößenverteilung von Mikrosilika ist am genauesten mit einem Rasterelektronenmikroskop in einem Auszählverfahren zu ermitteln. Die Dichte ist von der Entstaubungsanlage und der Nachbehandlung abhängig. Je nach Art des Siliziummetalls und der Siliziummetalllegierung ergeben sich die chemische Zusammensetzung des Mikrosilikas. Die puzzolanische Reaktion des Mikrosilikas wird auf den hohen Anteil an  $SiO_2$  zurückgeführt. Wird aus dem Mikrosilika für Lagerungs- und Transportzwecke ein Granulat hergestellt, kann dadurch das Volumen reduziert werden. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften bleiben davon unbeeinflusst [4].

Mikrosilika dient im Beton als Mikrofüller, das heißt der mittlere Korndurchmesser ist ca. 100 – mal kleiner als jener eines Zementkorns und kann somit die Zwischenräume zwischen den Zementkörnern füllen. Dies bedeutet eine höhere Packungsdichte des Betons welche wesentlich zu einer Festigkeitssteigerung führt (Füllereffekt) [4].

Zusätzlich zur Steigerung der Festigkeit durch den Füllereffekt weisen Mikrosilika eine hohe puzzolanische Aktivität auf. Diese wird durch zwei Faktoren bestimmt. Durch den Gehalt an reaktiven, silicatischen Bestandteilen, die mit dem Calciumhydroxid  $Ca(OH)_2$ , welches bei der Hydratation von Zement entsteht, reagiert. Als zweiter Faktor ist die zur Verfügung stehende Oberfläche des Puzzolans von wesentlicher Bedeutung [4]. Die puzzolanische Reaktion wird in Abb. 2.3 dargestellt.



**Abb. 2.3:** Puzzolanische Reaktion von Silikatzusätzen [4]

Durch Mikrosilika sinkt der Kapilarporenanteil im Zementstein. Dieser Effekt tritt durch den oben beschriebenen Füllereffekt ein. Einen wesentlichen Anteil an der Reduktion der Kapilarporen im Zementstein wird nach [4] der puzzolanischen Reaktion des Mikrosilika zugeschrieben.

#### 2.1.4 Packungsdichte

Das Prinzip von UHPC basiert unter anderem darauf, Mikrorisse und Poren (Gefügestörungen) durch die Wahl von geeigneten Ausgangsstoffen zu minimieren [19]. Die Packungsdichte beschreibt

das Feststoffvolumen in Abhängigkeit des Gesamtvolumens. Der Hohlraumgehalt ist dabei folgendermaßen definiert [13]:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_v}{R_v} = 1 - \Phi \quad (1)$$

Wobei die Packungsdichte wie folgt definiert ist:

$$\Phi = \frac{F_v}{R_v} \quad (2)$$

mit

$\varepsilon$	...	Hohlraumgehalt in Vol.-%
$\varepsilon_v$	...	Volumen des Hohlraums
$R_v$	...	Volumen des betrachteten Raums
$F_v$	...	Volumen des Feststoffes
$\Phi$	...	Packungsdichte

Eine höhere Packungsdichte führt zu einer Erhöhung der Festigkeit. Der Elastizitätsmodul und die Dauerhaftigkeit werden ebenfalls durch eine höhere Packungsdichte positiv beeinflusst. Die Erhöhung der Packungsdichte wird durch die Verringerung der Hohlräume möglich. Dies ist durch eine Abstimmung der Korngrößenverteilung möglich. Durch die steigende Anzahl immer kleiner werdender Partikel, ist theoretisch eine Packungsdichte von  $\Phi = 1$  erreichbar. Durch die Wahl einer weitgestuften Sieblinie können sogenannte "Schlupfkörner" zur Erhöhung der Packungsdichte beitragen [7], [13].

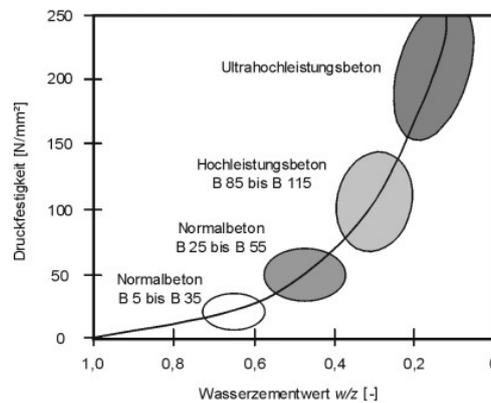
*Reschke* weist in [13] auf den Einfluss der Packungsdichte auf die Rheologie hin. Die Verarbeitbarkeit hängt vor allem bei hochfesten Betonen mit geringem Wasserbindemittelwerten von den verwendeten Feinstoffen ab.

### 2.1.5 Wasserzementwert / Wasserbindemittelwert

Die zwei wichtigsten Parameter mit einem Einfluss auf die Festigkeit, Schwindneigung, Frostbeständigkeit, Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit und Kriechvermögen des Zementsteins sind die Zementsorte und der Wasserzementwert [12].

Als Wasserzementwert (W/Z-Wert) wird das Massenverhältnis des im Beton enthaltenen Wassers und des Zements angegeben. Es ist ein wichtiger Kennwert für die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Durch einen höheren W/Z-Wert wird der Frischbeton plastischer und erhöht die

Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit. Ein geringer W/Z-Wert erhöht die Qualität des Festbetons. Für die vollständige Hydratation ist ein W/Z-Wert von 0,4 notwendig. Dabei werden ca. 25 % des Zementgewichtes chemisch gebunden und 15 % sind als Gelwasser notwendig [4].

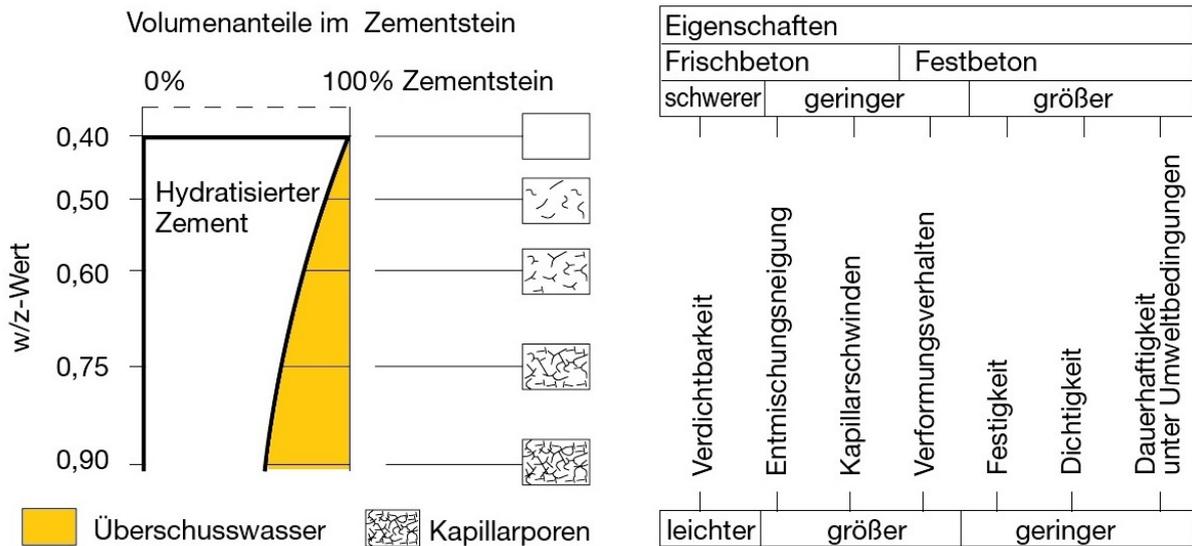


**Abb. 2.4:** Spektrum der Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit vom W/Z-Wert [20]

In Abb. 2.4 ist der Zusammenhang der Druckfestigkeit und des W/Z-Wertes ersichtlich. Normalbetone weisen, je nach Festigkeitsklasse, einen W/Z-Wert zwischen 0,4 und 0,7 auf, wobei Hochleistungsbetone mit einer Druckfestigkeit zwischen 85 N/mm<sup>2</sup> und 115 N/mm<sup>2</sup> einen geringeren W/Z-Wert als Normalbetone besitzen. Ultrahochfeste Betone weisen im Vergleich zu Hochleistungsbetonen und Normalbetonen den geringsten W/Z-Wert bei höheren Druckfestigkeiten auf.

Frisch- und Festbetoneigenschaften wie die Verdichtbarkeit, die Entmischungsneigung, das Kapillarschwinden, das Verformungsverhalten, die Festigkeit, die Dichtigkeit und die Dauerhaftigkeit unter Umweltbedingungen sind ebenfalls vom W/Z-Wert abhängig. In Abb. 2.5 ist zu erkennen, dass bei einem W/Z-Wert von 0,4 das gesamte Wasser für die Hydratation des Zements herangezogen wird. Die Graphik zeigt auch die Porenbildung in Abhängigkeit des W/Z-Wertes. Es ist zu sehen, dass bei höherem W/Z-Wert mehr Kapillarporen vorhanden sind als bei einem geringen W/Z-Wert.

In den letzten Jahren wird anstelle des W/Z-Wertes der W/B-Wert (3) verwendet. Bei diesem Wert handelt es sich um eine Gegenüberstellung der Masse des wirksamen Wassergehalts und dem Bindemittel, welches sich aus dem Zementgehalt und den hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen zusammensetzt. Diese Zusatzstoffe werden dem Bindemittelanteil mit einem Faktor  $k$  in Abhängigkeit der hydraulischen Wirkung des Zusatzstoffes angerechnet (4).



**Abb. 2.5:** Frisch- und Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit vom Wasserzementwert [21]

$$W/B = \frac{\text{Wasser}}{\text{Bindemittel}} \quad (3)$$

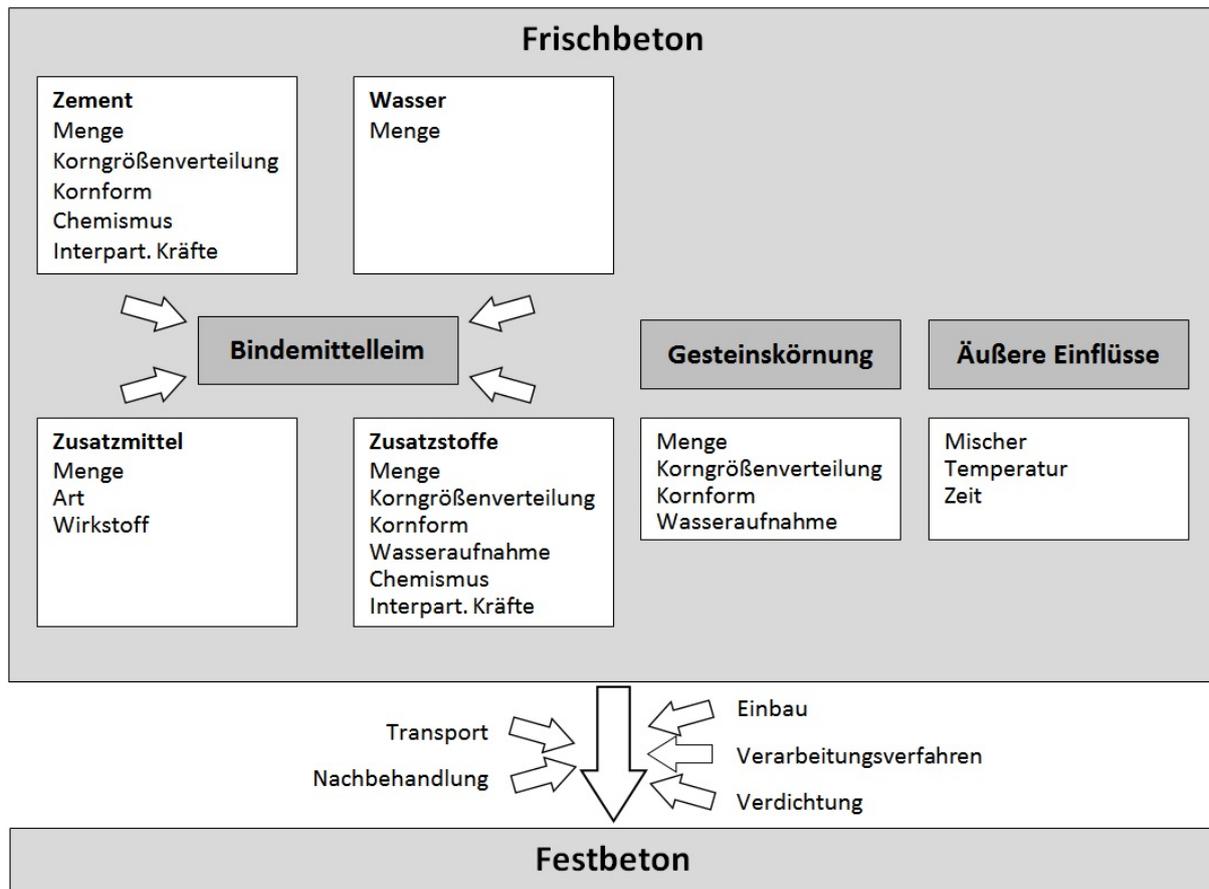
$$\text{Bindemittel} = \text{Zement} + k \cdot \text{hydraulisch wirksamer Zusatzstoff} \quad (4)$$

### 2.1.6 Rheologie

Unter Rheologie wird die Lehre der Deformation und des Fließens von Substanzen verstanden. Beschrieben werden dabei Zustände, welche zwischen dem Fließen einer idealviskosen Flüssigkeit (Newton'sche Flüssigkeit) und einem idealelastischen Körper stattfinden. Bei Newton'schen Substanzen ändert sich die Viskosität mit der Schergeschwindigkeit. Im Falle einer Bingham'schen Substanz ist Anfangs ein Widerstand zu überwinden, bevor es zu einem Schergefälle kommt, bzw. bevor die Substanz zu Fließen beginnt. Für die Beschreibung eines realen Stoffes sind beide Modelle zu kombinieren, da dieser sowohl einen viskosen als auch einen elastischen Deformationsanteil aufweist [13], [22].

Parameter, welche das rheologische Verhalten beeinflussen, sind in Abb. 2.6 dargestellt. Dabei wirken innere Einflüsse auf den Frischbeton wie beispielsweise die einzelnen Frischbetonkomponenten als auch die äußeren Einflüsse, welche sich durch den verwendeten Mischer, die Temperatur oder die Zeit ergeben. In dieser Graphik wird die Summe der Feststoffe mit einer maximalen

Korngröße von  $125\ \mu\text{m}$  als Bindemittelleim zusammengefasst.

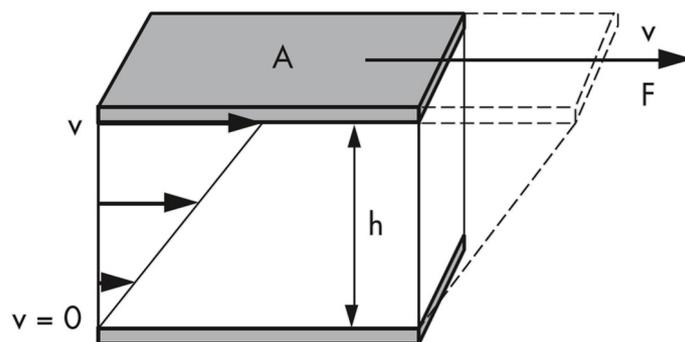


**Abb. 2.6:** Einflüsse auf die Rheologie von Beton nach [13]

In der Arbeit von *Reschke* [13] wird auf den Zusammenhang der Eigenschaften des Frischbetons und rheologischen Kennwerten eingegangen. Dabei wird die Pumpfähigkeit des Betons durch die plastische Viskosität und das Ausbreitmaß mithilfe der Fließgrenze erklärt.

Für die Bestimmung der rheologischen Parameter wird der Versuch mit dem Zwei-Platten-Modell herangezogen. Wie in Abb. 2.7 zu erkennen ist, handelt es sich bei dem Versuchsaufbau um zwei parallele Platten mit dem Abstand  $h$ , zwischen welchen sich die zu messende Flüssigkeit befindet.

Die obere der beiden Platten mit der Fläche  $A$  wird mit einer Kraft  $F$  bewegt, die untere Platte ist unbeweglich gelagert. Der Einwirkung wirkt die innere Reibung der Flüssigkeit entgegen. Bei der Geschwindigkeit  $v$  stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein. Die Messflüssigkeit wird unter den Voraussetzungen geschert, dass die Flüssigkeit an beiden Platten Wandhaftung



**Abb. 2.7:** Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit im Zwei-Platten-Modell [22]

besitzt und laminare Fließbedingungen herrschen. Daraus ergibt sich, dass die Messprobe an den Platten nicht rutscht oder gleitet und es zu keiner turbulenten Strömung kommt. Die Berechnung der rheologischen Parameter kann nur unter Einhaltung der beiden Bedingungen erfolgen. Diese sind bei der Einhaltung eines hinreichend kleinen Messspiels gewährleistet. Unter der Annahme einer laminaren Strömung ergibt sich ein Schergefälle zwischen den Platten [23], [22].

Nach *Mazanec* in [2] ergibt sich die Scherspannungsfunktion (5). Die Rheologie Bingham'scher Flüssigkeiten können durch die Fließgrenze und die plastische Viskosität in dieser Formel vollständig beschrieben werden. Für die Beschreibung Newton'scher Flüssigkeiten, wie beispielsweise Wasser, ist die Fließgrenze gleich Null zu setzen.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} + \tau_0 \quad (5)$$

mit

- $\tau$  ... Scherspannung in  $Pa$
- $\eta$  ... Scherviskosität in  $Pa \cdot s$
- $\dot{\gamma}$  ... Schergefälle/Scherrate in  $s^{-1}$
- $\tau_0$  ... Fließgrenze in  $Pa$

Die Darstellung des Fließverhaltens kann graphisch mit einer Fließkurve, siehe Abb. 2.8, dargestellt werden. Dabei werden die Scherrate und die Schubspannung in Abhängigkeit gestellt.

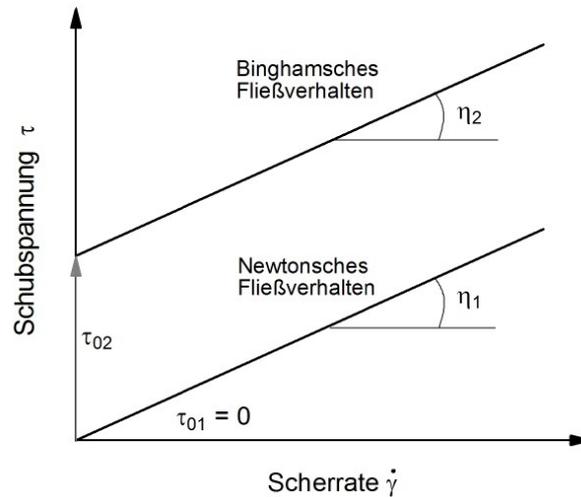


Abb. 2.8: Fließkurven von Newton und Bingham-Körper [2]

### 2.1.7 Nachbehandlung

Als Nachbehandlung von Beton versteht man Maßnahmen, welche dazu dienen, dem jungen Beton beim Erhärtungsvorgang die notwendige Feuchtigkeit für diesen zu erhalten. Speziell bei äußeren Umständen wie Wind oder Sonne, da diese die Dauerhaftigkeit und die Gebrauchstauglichkeit reduzieren können [6]. Die Nachbehandlung des jungen Betons beinhaltet somit alle Maßnahmen, welche diesen bis zum Erreichen einer ausreichenden Festigkeit schützen. Als Ziele der Nachbehandlung nennt *Lins* [1] den Schutz vor:

- vorzeitigem Austrocknen durch Wind, Sonne und geringer Luftfeuchtigkeit
- extremen Temperaturen und raschen Temperaturwechsel
- Niederschlag
- Schwingungen, Erschütterungen und anderen mechanischen Beanspruchungen
- vorzeitiger Einwirkung von Schadstoffen.

Die Nachbehandlung dient wie oben beschrieben einerseits dem Schutz des jungen Betons, andererseits die Betonfestigkeiten zu steigern. Diese Festigkeitssteigerung kann durch eine Nachbehandlung im Wasserbad oder im Klimaschrank erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist das Aufbringen einer Druckkraft während der Abbindephase [4].

Als Einflussfaktoren auf den Erhärtungsverlauf gelten bei UHPC nach *Schneider, Horvath, König, Dehn* folgende Faktoren [20]:

- W/B-Wert

- chemische Zusammensetzung des Zementes
- Mahlfineinheit des Zementes
- Hydratationsgrad des Zementes
- Zuschlagstoffe und Sieblinie
- verwendete Zusatzmittel und -menge
- Art und Menge der Zusatzstoffe
- Umgebungstemperatur
- Wärmebehandlung und/oder Druckbehandlung.

Als **thermale Nachbehandlung** versteht man eine Methode, um Betoneigenschaften mithilfe höherer Temperaturen beim Erhärtungsvorgang zu verbessern. Diese Verbesserung ergibt sich durch bessere Kristallisation der Hydratationsprodukte und die Aktivierung der puzzolanischen Reaktion des Mikrosilikas. Die Reaktion von Zementleim mit Mikrosilika führt unter hydrothermalen Bedingungen mit Temperaturen unter 200 °C zu Tobermorit. Über 200 °C kommt es in Abhängigkeit des Verhältnisses von  $CaO$  und  $SiO_2$  zur Bildung festigkeitssteigernder Silicathydrate wie Gyrolit und Xonotlit [4]. Hohe Temperaturen ergeben ein besseres Verhältnis von gebundenem zu freiem Wasser (freies Wasser entspricht dem Gesamtgewichtsverlust bei einer Temperatursteigerung auf 120 °C, gebundenes Wasser ist jene Menge des Gesamtwassers, welche Bestandteil der Calciumsilicathydrate ist.) Bei einer Nachbehandlung bei ca. 400 °C ist das vorhandene Wasser im Beton fast ausschließlich das gebundene Wasser. Dadurch wird verhindert, dass aggressive Medien durch das Wasser in den Beton geleitet werden, was die Dauerhaftigkeit positiv beeinflusst [4]. *Schneider* und *Horvath* konnten in [4] durch Versuche zeigen, dass sich durch die thermische Nachbehandlung die puzzolanische Aktivität zwischen Silicatstaub und Calciumhydroxid erhöht. Aus den genannten Punkten kann somit auf eine positive Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch thermische Nachbehandlung geschlossen werden.

Unter **hydrothermaler Nachbehandlung** versteht man die Nachbehandlung des Betons nach dem Ausschalen bei 90 °C im Wasserbecken. Durch diese Form der Nachbehandlung, kann die Druckfestigkeit innerhalb kurzer Zeit gesteigert werden. Die Druckfestigkeiten liegen dabei um 60 - 70 % höher als bei normaler Nachbehandlung bei 20 °C und 65 % r.F. [4].

Die Erhöhung der Druckfestigkeit kann auch durch eine **Steigerung der Dichte** des Betons erfolgen, welche sich durch eine Druckbeaufschlagung auf den jungen Betons ergibt. Durch Beaufschlagung mit Druck wird die eingeschlossene Luft im Frischbeton innerhalb der ersten Minute reduziert, bei weiterer Beaufschlagung wird nach wenigen Minuten das überschüssige

Wasser ausgetrieben. Bei der Beibehaltung der Druckbeaufschlagung für einen Zeitraum von 6 - 12 Stunden kann der Porositätsanteil des chemischen Schwindens vollständig reduziert werden. In der Abbindephase entstehen durch die Druckbeaufschlagung Mikrorisse, welche während der Erhärtung verheilen [4].

## 2.2 Früh- und Festbetoneigenschaften von UHPC

Jeder Beton kann sowohl als Frisch- als auch als Festbeton geprüft werden. Dabei werden Eigenschaften wie die Temperatur zum Ende des Mischvorganges, die Rohdichte oder die Festigkeit festgestellt. Es gibt Eigenschaften, welche sich zeitabhängig verändern und welche, die nur in einem bestimmten Zustand des Betons geprüft werden können, beispielsweise am Frischbeton. Im Zuge dieser Arbeit werden verschiedene Eigenschaften des Frisch- und Festbetons geprüft und gemessen, welche auf verschiedene Normen zurückgreifen.

Die Prüfungen des Frischbetons werden mit dem frisch gemischten Beton, welcher noch flüssig bzw. zähflüssig ist, durchgeführt. Für die Prüfung am Festbeton wird der Frischbeton in Formen gefüllt, siehe Abb. 2.9, in denen der Beton erhärtet.

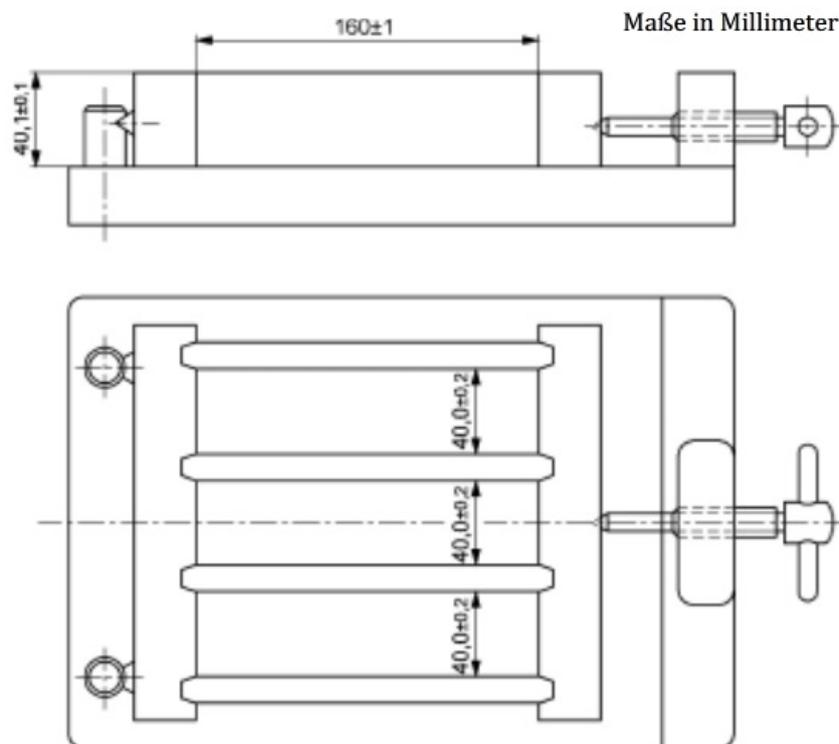


Abb. 2.9: Form für die Herstellung von Probekörpern nach [27]

Durch Einflüsse wie Temperaturänderungen, Wasseraufnahme, Trocknung, Lasteinwirkung sowie inneren Vorgänge bei der Hydratation kann es beim Frisch- und Festbeton zu Formände-

rungen kommen. Dabei entstehen innere Spannungen, durch die es bei einer Überschreitung der Festigkeit zu Rissen kommen kann [6]. Vorgänge wie Schrumpfen, Schwinden, Quellen, Treiben sowie Verformung durch Temperatur oder Lastaufbringung werden in dieser Arbeit nicht im Detail behandelt.

### 2.2.1 Frischbetoneigenschaften

Am Frischbeton werden folgende Eigenschaften geprüft:

- Konsistenz
- Luftgehalt
- Rohdichte
- Viskosität
- Rheologie.

Die Konsistenz ist ein Maß der Steife und gibt beim Frischbeton einen Kennwert für die Verarbeitbarkeit des Betons an [6]. Sie gilt als wichtigste Frischbetoneigenschaft. Einflussfaktoren dafür sind vor allem der Wassergehalt, der Zementgehalt und die Gesteinskörnungen. Weiter kann die Konsistenz über die Zugabe von Zusatzstoffen und -mitteln beeinflusst werden [9].

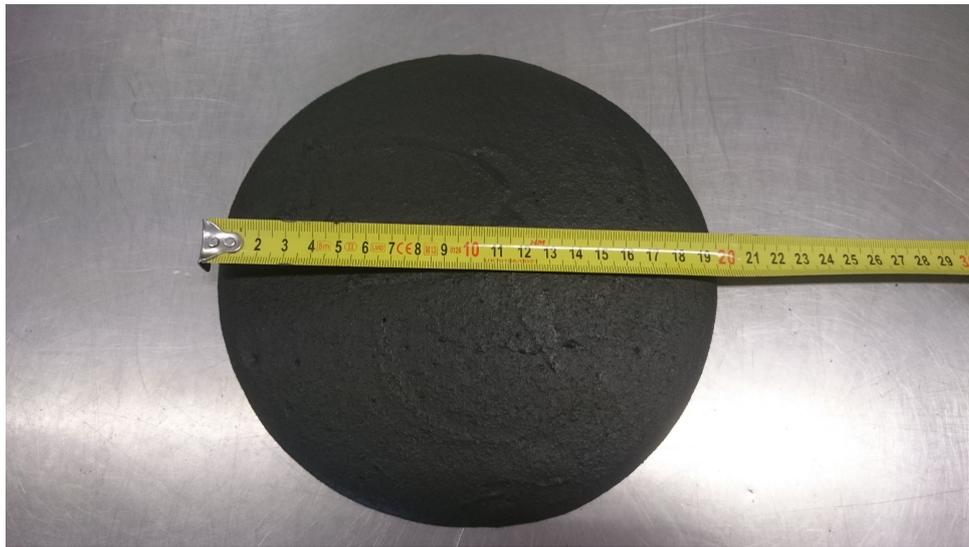
Der Luftgehalt ist eine weitere Eigenschaft, welche am Frischbeton gemessen wird. Ein hoher Luftgehalt vermindert die Festigkeit des Betons. Zum Zweck der Erhöhung von Frost- und Taumittelbeständigkeit können in Normalbeton mithilfe von Luftporenbildner Poren eingebracht werden [6].

Als weitere Eigenschaft des Frischbetons kann die Frischbetonrohichte genannt werden. Sie gibt die Masse in kg pro  $\text{dm}^3$  von frischem Beton inklusive der Poren nach der Verdichtung an. Die Frischbetonrohichte kann für eine erste Beurteilung der Betongüte herangezogen werden. Bei gleichem Zementanteil und gleicher Gesteinskörnung kann bei einer niedrigeren Rohdichte eine geringere Betonfestigkeit erwartet werden [6].

Mit der Messung der Trichterauslaufzeit in Sekunden wird die Viskosität des Frischbetons bestimmt. Je höher die Viskosität eines Stoffes ist, desto weniger fließfähig ist er. Im folgenden werden die Prüfverfahren für den Frischbeton kurz beschrieben.

### 2.2.1.1 Ausbreitfließmaß

Das Ausbreitfließmaß gibt Aufschluss über die Konsistenz des Frischbetons. Die Bestimmung des Ausbreitfließmaßes erfolgt mit einem Setztrichter nach ÖNORM EN 459-2 [24]. Die Frischbetonprobe wird in den Setztrichter eingebracht, welcher auf einer feuchten Edelstahloberfläche steht. An der Oberkante wird der überstehende Frischbeton mit einer Spachtel abgezogen. Der Trichter wird angehoben und die Probe breitet sich aus. Die Diagonale der Probe wird gemessen (siehe Abb. 2.10).

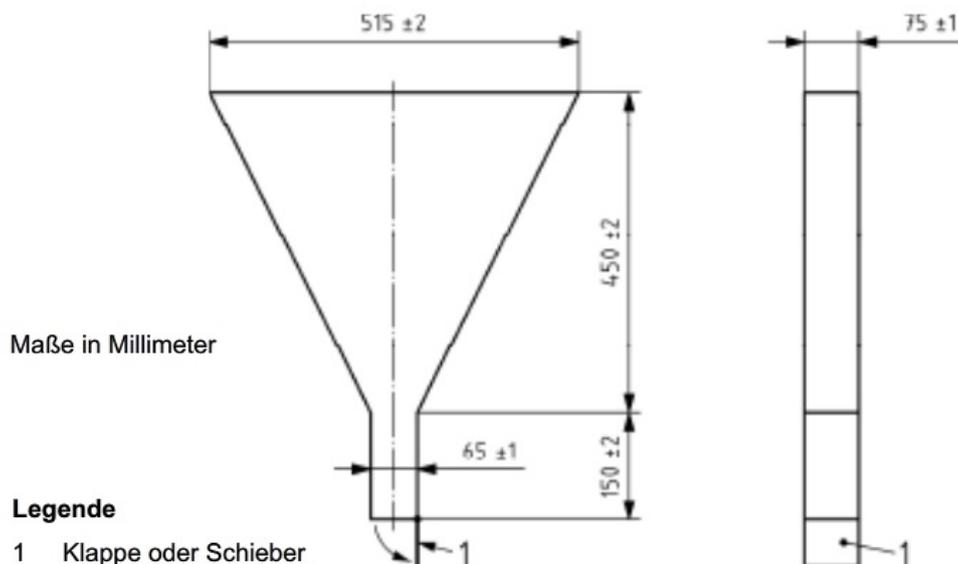


**Abb. 2.10:** Bestimmung des Ausbreitfließmaßes einer Betonprobe

### 2.2.1.2 Trichterauslaufzeit

Die Trichterauslaufzeit, die nach ÖN EN 12350-9 ermittelt wird, gibt Aufschluss über die Viskosität und die Füllfähigkeit des Frischbetons. Die Norm regelt die Auslaufzeit von selbstverdichtenden Betonen, der Wert in Sekunden wird als Vergleichswert zwischen den Mischungen herangezogen.

Die Norm legt für selbstverdichtende Betone das Größtkorn mit einer Gesteinskörnung von 22,4 mm fest. Die Trichterauslaufzeit wird mit Hilfe eines V-förmigen Trichters ermittelt. Dieser ist nach Abb. 2.11 genormt. Der Trichter ist aus einem Material, welches vom Zementleim nicht leicht angegriffen werden kann und nicht rostet. Zusätzlich verfügt der Trichter über eine schnellauslösende Klappe. Vor jedem Versuch ist der Trichter und die Klappe zu reinigen, die Innenflächen anzufeuchten und die Klappe zu schließen. Nach dem Befüllen des Trichters mit dem Frischbeton soll dieser nicht gerüttelt oder verdichtet werden. Der Beton ist mit einem Lineal an



**Abb. 2.11:** Prüfgerät für die Messung der Trichterauslaufzeit nach [25]

der Trichteroberkante bündig abzuziehen. Es soll ein Kübel unter dem Trichter platziert werden, um den Beton aufzufangen. Die Klappe an der Unterseite des Trichters soll ca. 10 Sekunden nach dem Befüllen geöffnet werden. Die Trichterauslaufzeit wird ab öffnen der Klappe bis zu dem Zeitpunkt gemessen, ab dem es erstmals möglich ist, vertikal durch den Trichter in den Behälter zu blicken. Sollte der Trichter verstopfen, ist die Prüfung zu wiederholen. Sollte der Trichter erneut verstopfen, besitzt der Frischbeton keine ausreichende Viskosität und Füllfähigkeit.

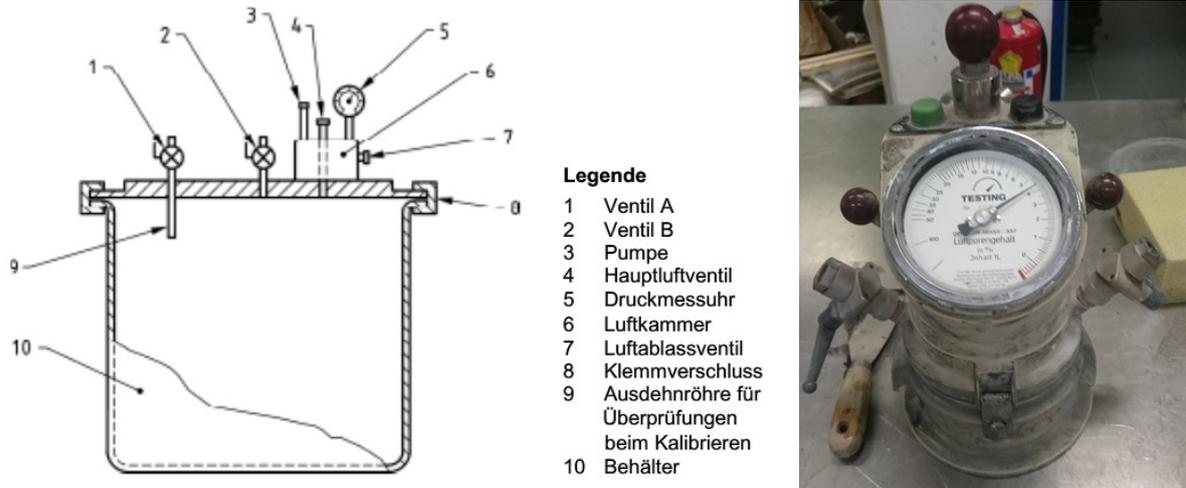
### 2.2.1.3 Bestimmung des dynamischen Fließmoments und der Viskosität

Im Zuge der Frischbetonprüfungen wird die Probe mit einem Viskomat gemessen. Dabei wird die Probe in einen Zylinder gefüllt. Die Messung des dynamischen Fließmoments und der Viskosität erfolgt anhand eines vorgegebenen Rampe. Die Rheologie der Frischbetonprobe wird im Kapitel 2.1.6 auf Seite 21 genauer beschrieben und ist hier zur Vollständigkeit angeführt.

### 2.2.1.4 Luftgehalt

Der Luftgehalt wird nach der Fertigstellung der Mischung am Frischbeton gemessen. Als wesentliche Einflussfaktoren für den Luftgehalt gelten die Sieblinie der Körnung und die Güte der Verdichtung [9]. Die Messung bzw. Prüfung des Luftgehaltes im Frischbeton erfolgt nach ÖNORM EN 12350-7 [26].

Die Messung des Luftgehaltes erfolgt mit dem Druckausgleichsverfahren. Dabei wird die Probe in einen Behälter aus Stahl gefüllt. Die Oberfläche der Probe soll bündig mit der Oberkante des



**Abb. 2.12:** Prüfgerät für das Druckausgleichsverfahren nach [26] (links) und das verwendete Gerät (rechts)

Behälters abschließen. Ein Verschlussdeckel aus Metall wird dem Behälter aufgesetzt. Die sich berührenden Ränder des Behälters und des Deckels müssen glatt geschliffen und gereinigt sein, um einen druckdichten Verschluss zu ermöglichen. Nach dem Verschließen wird das Hauptventil geschlossen und die Ventile A und B werden geöffnet. In eines der beiden Ventile wird so lange Wasser gefüllt, bis es beim anderen Ventil hervortritt. Um die restliche Luft aus dem Behälter zu bekommen, wird mit einem Schlegel gegen den Behälter geklopft. Nach dem schließen der Luftkammer wird Luft in die Kammer gepumpt, bis der Zeiger des Druckmessers reagiert. Nach wenigen Sekunden wird die Nullpunktsanzeige am Manometer durch Ablassen oder Nachpumpen stabilisiert. Die Ventile A und B werden geschlossen und das Hauptventil wird geöffnet. Nach erneutem klopfen auf die Behälterwand wird der Anzeigewert abgelesen, was dem scheinbaren Luftgehalt der Probe entspricht [26].

Für die Bestimmung des Luftgehaltes wird ein Luftporentopf mit einem Fassungsvermögen von einem Liter verwendet.

### 2.2.1.5 Bestimmung der Rohdichte

Die Rohdichte wird im Anschluss der Messung des Luftgehaltes durchgeführt. Es wird die Probe im Luftporentopf mit einem Fassungsvermögen von einem Liter herangezogen.

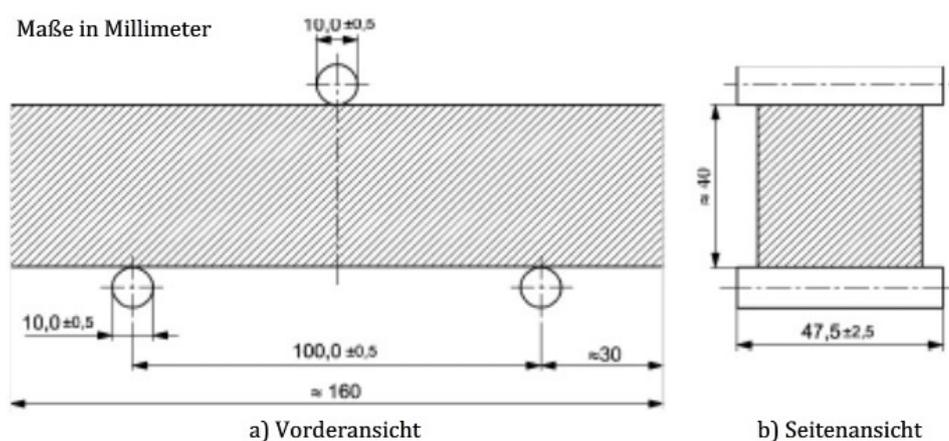
### 2.2.2 Festbetoneigenschaften

Wie am Anfang dieses Kapitels beschrieben, wird der Frischbeton in Formen nach [27] gefüllt. Dieser wird nach dem Befüllen mit einer Spachtel abgezogen, um eine gerade Oberfläche zu

erzeugen. Um eine Austrocknung an der Oberseite zu vermeiden, werden die Probekörper mit einer Folie abgedeckt. Im Zuge der Diplomarbeit werden die Probekörper keiner weiteren Nachbehandlung unterzogen. Die Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm werden nach einem Tag aus den Formen genommen und an der Luft gelagert. An den Probekörpern wird zuerst die Biegezugfestigkeit geprüft. Im Anschluss an die Prüfung werden die gebrochenen Prismen für die Prüfung der Stempeldruckfestigkeit verwendet.

Um den Verlauf der Biege- und Druckfestigkeit während der ersten 56 Tagen aufzuzeigen, werden Versuche nach 24 h, 7 Tagen, 28 Tagen und 56 Tagen durchgeführt.

### 2.2.2.1 Biegezugfestigkeit



**Abb. 2.13:** Belastungsanordnung zur Bestimmung der Biegefestigkeit nach [27]

Die Bestimmung der Biegefestigkeit der Probekörper erfolgt nach der Anordnung in Abb. 2.13. Prüfgerät Biegevorrichtung Stahlrollen als Auflager im Abstand von  $100 \pm 5$  mm und einer Stahlrolle für die Lastaufbringung mittig zwischen den Auflagern. Die Achsen müssen vor und während der Prüfung parallel sein. Eine Tragrolle und die Belastungsrolle müssen schwenkbar sein um eine gleichmäßige Lastaufbringung in den Probekörper zu ermöglichen ohne Torsionsspannungen zu erzeugen.

### 2.2.2.2 Druckfestigkeit

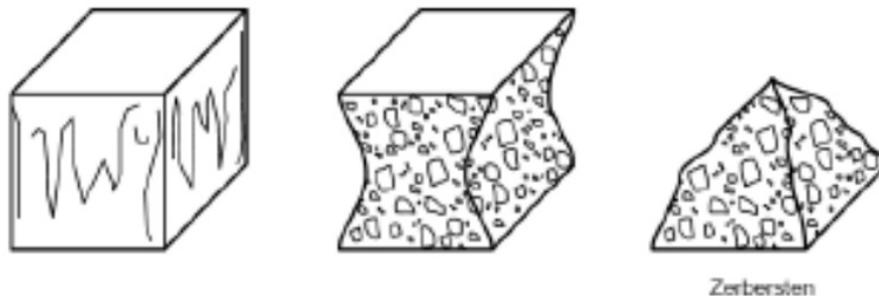
Die Druckfestigkeit ist die wichtigste Eigenschaft vom Festbeton. Diese wird mit einem Druckversuch ermittelt [6].

Als Probekörper kommen Würfel, Zylinder oder Bohrkerne zum Einsatz. Vor Beginn der Prüfung sind die Auflageflächen der Prüfmaschine zu reinigen. Die Probekörper (Würfelproben) sind normal zur Einfüllrichtung des Betons zu prüfen. Als Belastungsgeschwindigkeit werden

$0,6 \pm 0,2$  MPa/s in der ONR 23303 [28] vorgegeben.

Für die Prüfungen im Zuge der Diplomarbeit werden die gebrochenen Prismen des Biegezugversuches für die Druckfestigkeitsprüfung herangezogen.

Abb. 2.14 zeigt Bruchtypen vor Würfeldruckproben mit normalen Belastungsverlauf.



**Abb. 2.14:** Normale Bruchtypen bei Würfelproben nach [28]

### 2.2.2.3 Rohdichte von Festbeton

Die Rohdichte von Festbeton kann in drei Zuständen gemessen werden:

- wie angeliefert
- wassergesättigt
- im Wärmeschrank getrocknet.

Die Berechnung der Dichte erfolgt über die ermittelten Werte der Masse und des Volumens. Die Ermittlung des Volumens erfolgt mithilfe von Messschiebern und Linealen, wobei die Abmessungen auf 0,25 % genau bestimmt werden sollen oder durch Wasserverdrängung. Die Masse ist mit einer Waage, welche es ermöglicht, den Probekörper an der Luft und unter Wasser zu messen, auf 0,1 Masse Prozent genau zu wägen [28].

Im Zuge dieser Arbeit wird jeweils nur die Rohdichte wie angeliefert bestimmt.

## 2.3 Mischprozess

### 2.3.1 Allgemeines

Für die Herstellung von Beton ist das Vermischen der einzelnen Betonbestandteile unerlässlich. Mischen definiert sich dabei nach *Weinekötter und Gericke* als Vereinigung getrennt vorliegender Stoffe zu einem Gemisch. Ziel dabei ist es, Unregelmäßigkeiten der Zusammensetzung, der

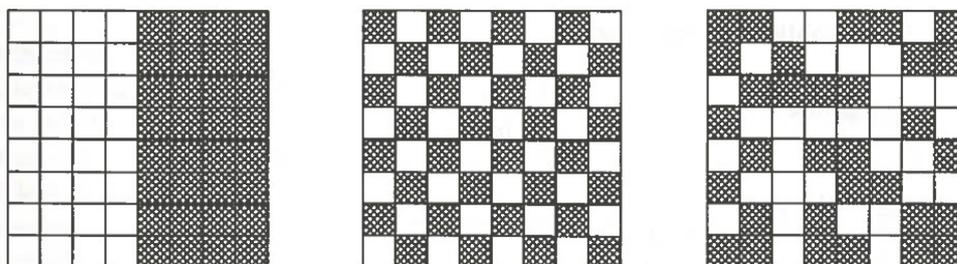
Eigenschaften und Temperatur des Gemisches zu verringern. Demzufolge ist die wichtigste Anwendung des Mischens die Herstellung homogener Mischungen aus verschiedenen Stoffen [29].

Bei der Mischung von Beton werden die trockenen Partikel durch die Zugabe von Wasser von einem Partikelgemisch in eine Suspension übergeführt. Dies geschieht durch eine ausreichende Zugabe an Wasser. Bei der Herstellung von ultrahochfesten Betonen ist der Wassergehalt der Mischung jedoch zu gering, um die Partikel zu dispergieren. Durch die Flüssigkeitsbrücken, welche durch die geringe Flüssigkeitsmenge entstehen, können sich die Partikel zu Agglomerationen verbinden [2]. Um diese Agglomerationen aufzubrechen, sind einerseits ein ausreichend hoher Energieeintrag und andererseits der Zusatz von Verflüssigern notwendig.

Mischen von Feststoffen wird durch bewegen oder bewegt werden der Partikel erzeugt. Durch Abweichungen im Bewegungsverhalten der Partikel kann es zu Entmischvorgängen beim Mischen kommen, welche eine ideale Zufallsmischung verhindert [29].

Die meisten Mischer erfüllen ihre Aufgabe des Mischens, indem sie in den Stoffen Platzwechsellvorgänge anregen. Diese erfolgen nach dem Gesetz der Wahrscheinlichkeit [30].

Abb. 2.15 zeigt zwei Stoffe, welche im linken Bild vollkommen geordnet, im mittleren geordnet und im rechten zufällig vorliegen. Da das Ziel des Mischens nach [29] die Herstellung einer homogenen Mischung ist, ist die geordnete Probe in der Mitte der Abbildung anzustreben.



**Abb. 2.15:** Idealierte Mischungszustände nach [29]

Mischen kann kontinuierlich und diskontinuierlich erfolgen. Kontinuierliche Mischer weisen meist ein kleineres Kammervolumen bei gleichem Durchsatz und eine kürzere Mischzeit auf [30].

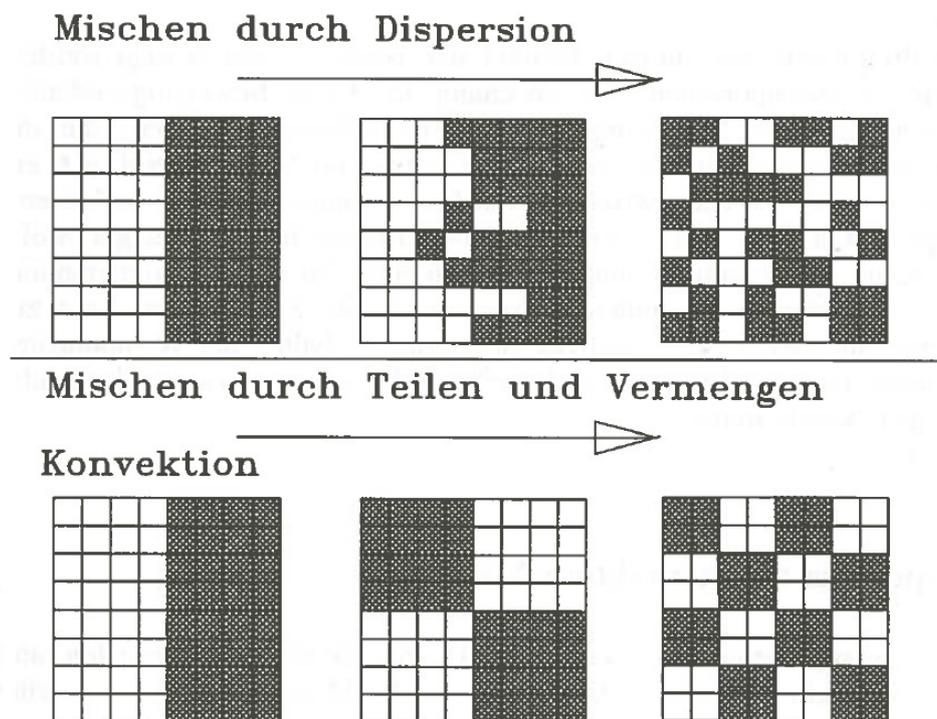
Eine weitere Unterscheidung kann in statische und dynamische Mischer erfolgen. Als dynamische Mischer bezeichnet man Systeme bei denen sich der Behälter und / oder das Mischorgan bewegt. Statische Mischer erreichen eine Homogenisierung des Mischgutes durch feststehende Einbauten unter der Nutzung der Strömungsenergie des Fluids. Statische Mischer sind immer kontinuierliche Mischer [30]. Entsprechend kommen beim Mischen von Beton dynamische Mischer zur Verwendung.

### 2.3.2 Mischarten

Man unterscheidet folgende fünf Mischarten:

#### Dispersives und konvektives Mischen

Ein Mischvorgang beschreibt eine Bewegung eines Feststoffes und setzt sich im wesentlichen aus zwei Mechanismen, Dispersion und Konvektion, zusammen, siehe Abb. 2.16.



**Abb. 2.16:** Mechanismen des Mischens (Dispersion und Konvektion) [29]

**Dispersion** beschreibt die zufälligen Platzwechsel einzelner Partikel im Stoff und zeigt damit einen lokalen Effekt, welcher bei einem bereits vorgemischtem Stoff eine hohe Effizienz zeigt. Der ausschlaggebende Faktor für die Häufigkeit der Platzwechsel unterschiedlicher Partikel ist das Vorhandensein einer anderen Stoffkomponente in der Nachbarschaft des Partikels. Die Bewegung größerer Partikelgruppen relativ zueinander nennt man **Konvektion**. Die Stoffmenge wird geteilt und wechselt den Platz. Dieser Vorgang wiederholt sich kontinuierlich mit immer kleiner werdenden Stoffmengen. Konvektives Mischen geschieht beispielsweise durch rotierende Werkzeuge oder Mischbehälter [29].

### Distributives Mischen

Distributives Mischen erfolgt durch eine Lageänderung der Partikel, welche ohne große Schergeschwindigkeiten durchgeführt wird [7].

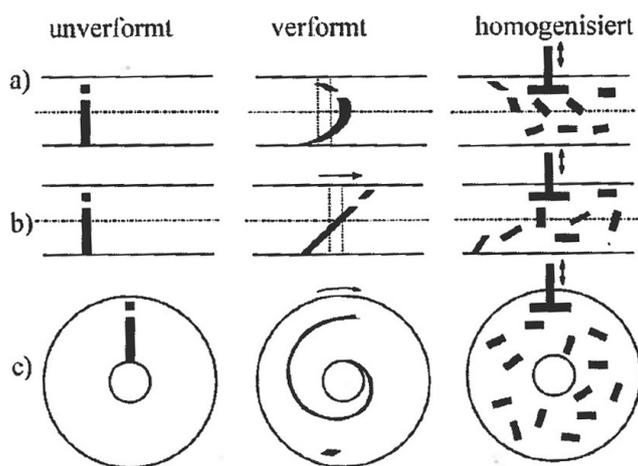
### Diffuses Mischen

Durch Wärmebewegung von Molekülen und Atomen sowie durch konvektive Wärmebewegungen kommt es zu Platzwechselfvorgängen im Stoffgemisch und damit zu einer Durchmischung [30]. Die Diffusion von Feststoffen ist sehr gering und hat damit nur eine untergeordnete Bedeutung beim Mischprozess von Feststoffen.

Bei Feststoffen entspricht die Diffusion der Dispersion. Die Ursache für die Vermischung liegt bei der Dispersion jedoch nicht am Konzentrationsgradienten sondern an einer erzwungenen Bewegung [29].

### Laminares Mischen

Laminare Mischvorgänge lassen sich anhand einer Scherströmung in mehreren Konfigurationen beschreiben: a) zwei ruhende Platten, b) einer ruhenden und einer bewegten Platte und c) zwei konzentrische Zylinder. Die in Abb. 2.17 dargestellten Fluidelemente zeigen, dass die Verschiebung der Elemente nur in Richtung der Stromlinien erfolgt. Durch die Verwendung eines Stempels kann eine Vermischung der Elemente auch in Querrichtung erfolgen [30].



Modelle zur Beschreibung des laminaren Mischens

- a) Strömungskanal, beide Platten ruhen
- b) bewegte Platte und eine ruhende Platte
- c) koaxiale Zylinder, außen bewegt.

**Abb. 2.17:** Modelle zur Beschreibung laminaren Mischens [30]

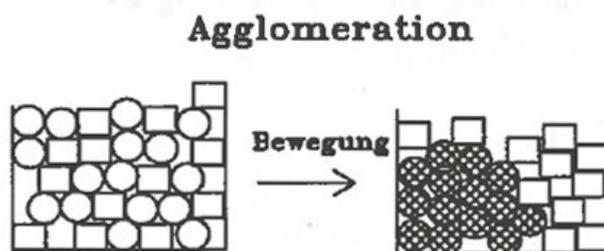
## Turbulentes Mischen

Turbulentes Mischen beinhaltet örtlich instationäre und dreidimensionale Wirbelströmungen. Durch die Variation der Geschwindigkeit in jedem Punkt, kommt es bei Messungen zu Zufallsgrößen, welche nicht reproduzierbar sind. Es ergibt sich dadurch ein hoher notwendiger Energieeintrag zur Aufrechterhaltung der Turbulenzen.

### 2.3.3 Entmischen

Das Bewegungsverhalten der einzelnen Stoffpartikel wird von deren Eigenschaften beeinflusst. Dazu zählen unter anderem Größe, Form, Dichte, Reibung und Anziehungskräfte. Weiter wird die Bewegung vom verwendeten Mischer zusätzlich beeinflusst. Diese genannten Faktoren können die gewünschte Mischgüte durch Entmischung verhindern [29].

Als wesentlicher Faktor für die Entmischung wird von *Weinekötter* und *Gericke* die unterschiedliche Größe der zu mischenden Partikel bezeichnet. Als Mechanismen der Entmischung werden Agglomeration, Aufschwimmen, Durchsickern und Entmischen in der Strömung genannt [29].



**Abb. 2.18:** Mechanismus der Agglomeration [29]

Abb. 2.18 zeigt zwei Komponenten, welche sich durch Agglomeration entmischen. Agglomeration entsteht durch interpartikuläre Kräfte bei engem Kontakt der Partikel. Die Kräfte zwischen den Partikeln können auf Festkörperbrücken, Formschluss, Flüssigkeitsbrücken oder elektrostatische Kräfte zurückgeführt werden. Bei Partikel unter  $30 \mu\text{m}$  wirken wechselseitig induzierte Dipolkräfte (van-der-Waals-Kräfte). Agglomerate benötigen Scherenergie um die Agglomerate aufzubrechen [29].

### 2.3.4 Arten von Mischern

Der Mischprozess in einem Mischer wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Diese lassen sich in vier Hauptgruppen einteilen. Die erste Hauptgruppe bezieht sich auf Maschineneinflussgrößen

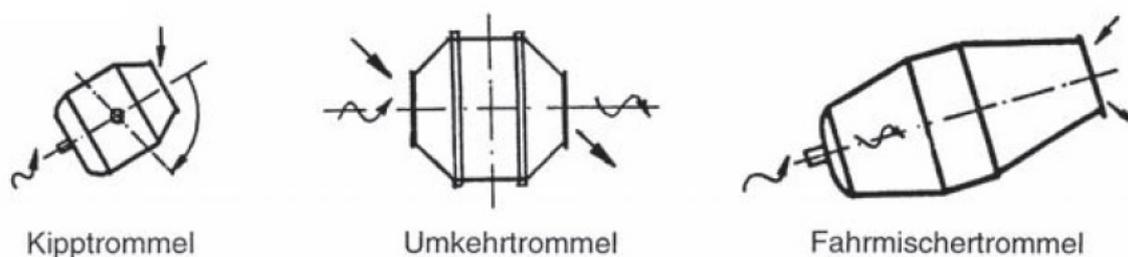
wie den Bautyp oder die Werkzeuggeometrie. Die zweite Hauptgruppe beschreibt Betriebseinflussgrößen wie den Füllgrad, die Drehfrequenz und den Aufgabeeort. Als dritte Hauptgruppe werden die Produkteinflussgrößen des Mischgutes, wie beispielsweise Viskosität, Löslichkeit und Koaleszenz genannt. Die letzte Hauptgruppe der Einflussfaktoren auf den Mischprozess sind die Umgebungseinflussgrößen wie die Temperatur und der Druck [30].

Mischer können in absatzweise und kontinuierlich arbeitende Mischer unterteilt werden. Als absatzweise arbeitende Mischer oder Chargenmischer können Freifall- und Zwangsmischer genannt werden. Charakteristisch für diese Art von Mischer ist der Arbeitsablauf, welcher sich aus Beschicken, Mischen und Entleeren zusammensetzt [31], [32].

#### 2.3.4.1 Freifallmischer

Freifallmischer (oder Trommelmischer) bestehen aus einer drehenden Trommel mit horizontaler oder schräger Achse mit an der Innenseite fest verbundenen Mischschaufeln. Beim Mischen befördert das Mischwerkzeug die zu mischenden Komponenten nach oben. Von dort fällt das Mischgut bei weiterer Rotation der Trommel nach unten und wird wieder von einer Schaufel aufgenommen. Das Mischen findet durch wiederholtes fallen des Mischgutes statt. Die Befüllung und die Entleerung der Trommel findet meist durch die selbe Öffnung statt [31], [32].

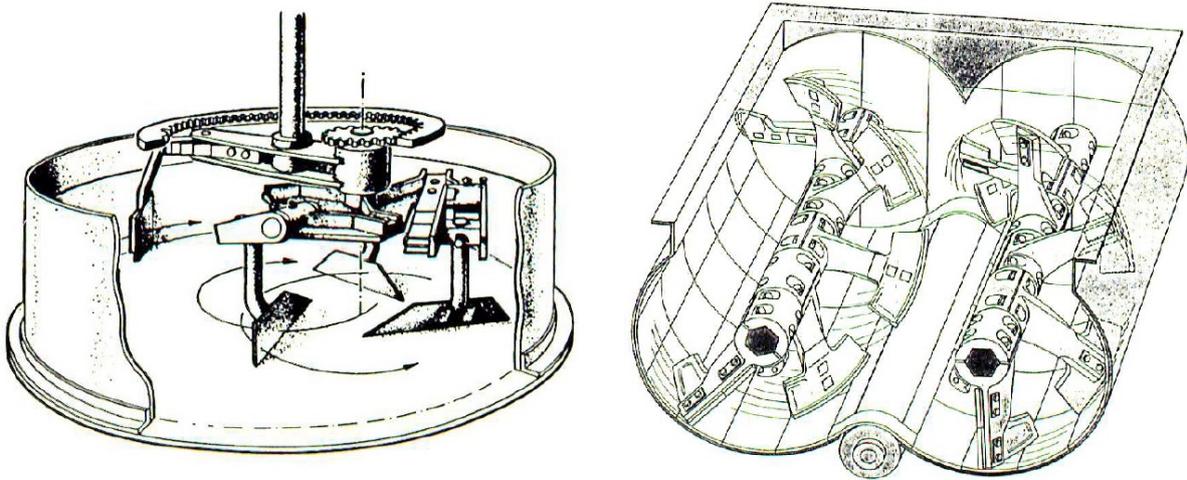
Freifallmischer werden für die Herstellung kleiner Betonmengen verwendet. Fahrmischer arbeiten ebenso nach dem Prinzip des Freifallmischers, siehe Abb. 2.19 [33].



**Abb. 2.19:** Mischsysteme Freifallmischer [33]

#### 2.3.4.2 Zwangsmischer

Durch Rührwerkzeuge wird das Mischgut zwangsweise gemischt. Sie weisen eine kürzere Mischzeit als Freifallmischer auf. Bauformen von Zwangsmischer sind Tellermischer und Trogmischer, siehe Abb. 2.20 [31].



**Abb. 2.20:** Tellermischer (links) und Trogmischer (rechts) [32]

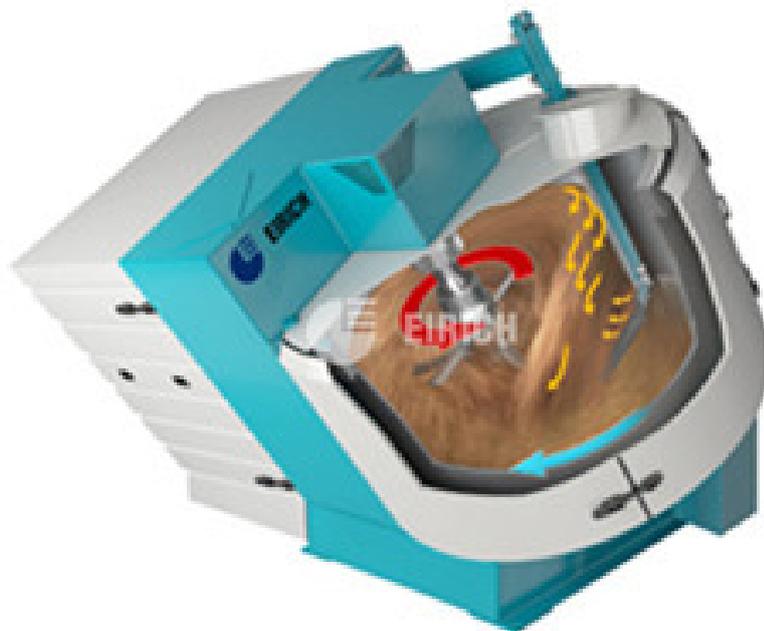
Durch umlaufende Schaufeln ergibt sich beim **Tellermischer** ein besserer Anschluss des Zements und somit eine höhere Betonfestigkeit. Der Aufbau besteht aus einem feststehenden Mischsteller mit auf Federn gelagerten Mischschaufeln. An den Seitenrändern sind Abstreifer für die Seitenwände angebracht. Die Entleerung erfolgt über eine Öffnung am Boden [32].

Ein **Trogmischer** setzt sich aus einer oder zwei waagrechten Wellen und einem feststehenden oder kippbaren Trog zusammen. Die Wellen sind mit Mischwerkzeugen bestückt welche das Mischgut bei Rotation zwangsweise mischen. Die Entleerung des Mischgutes erfolgt entweder durch einen Rundschieberverschluss im Trog oder durch kippen des Mischtroges [32].

#### 2.3.4.3 Eirich-Intensivmischer

Mischer des Herstellers Eirich unterscheiden sich durch den schräg gestellten, angetriebene Mischgutbehälter von anderen Mixern, siehe Abb 2.21.

Der drehende Mischgutbehälter fördert das Mischgut zu den Mischwerkzeugen. Die Mischwerkzeuge sind exzentrisch angebracht und können sowohl in Drehrichtung als auch in der Geschwindigkeit den Erfordernissen angepasst werden. Durch einen Wand-Boden-Abstreifer erfolgt eine zusätzliche Durchmischung. Anhäufungen des Mischgutes an der Behälterwand und dem -boden werden verhindert [34]. Das Strömungsbild, welches sich im Eirich-Mischer beim Quer- und Gegenstromprinzip ergibt, ist in Abb. 2.22 zu erkennen.



**Abb. 2.21:** Mischerprinzip Eirich-Mischer [34]

Durch die Drehung des Mischbehälters wird das Mischgut nach oben transportiert und fällt durch Scherkräfteinwirkung wieder nach unten. Die Zuführung des Mischgutes wird vom Wandabstreifer unterstützt. Eine hundertprozentige Umwälzung des Mischgutes ist dadurch innerhalb einer Umdrehung möglich [19].

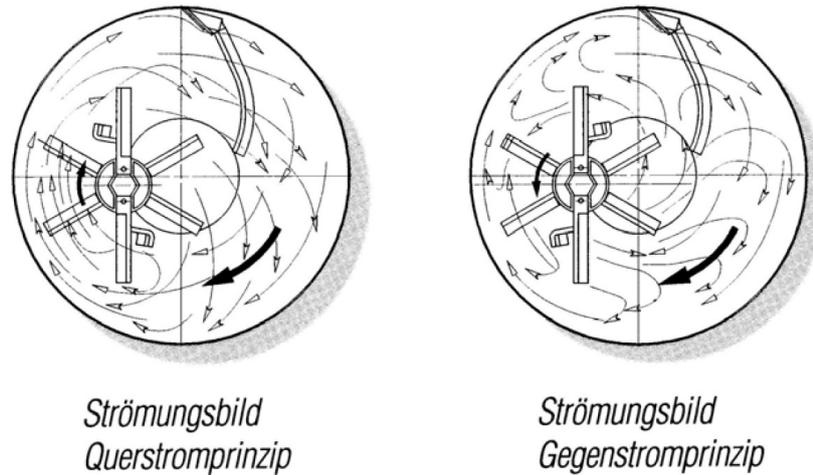
Für die Versuchsreihen, welche im Zuge dieser Arbeit durchgeführt werden, wurde ein Eirich-Intensivmischer R02 Vac mit 3 - 5 l Fassungsvermögen verwendet.

#### **2.3.4.4 Eirich Intensivmischer mit Vakuumeinrichtung**

Der Eirich Intensivmischer mit Vakuumeinrichtung ist eine Weiterentwicklung des Intensivmischers. Dieser wird baulich so konzipiert, dass ein Betrieb unter Vakuum möglich ist. Zusätzlich ist es möglich, während des Mischvorgangs zu Entlüften, zu Trocknen, zu Kühlen oder Wärme zuzuführen [34].

## **2.4 Globally Harmonized Systems (GHS)**

Globally Harmonised Systems of Classification and Labelling of Chemicals ist ein neues System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien. Die Ausarbeitung dieses Systems erfolgte durch Gremien der Vereinten Nationen zum Schutz von Mensch und Umwelt. Durch die Produktion und Handhabung von Chemikalien entstehen Gefahren für den Mensch und die Umwelt. Verschiedene Einstufungssysteme für Chemikalien auf der ganzen Welt können dazu



**Abb. 2.22:** Strömungsbild in einem Eirich-Mischer [19]

führen, dass Stoffe in verschiedenen Ländern als gesundheitsschädlich, giftig oder nicht gefährlich eingestuft werden. Durch die Vereinheitlichung mit GHS sollen Chemikalien zukünftig weltweit einheitlich eingestuft und gekennzeichnet werden. Dadurch soll nicht nur dem Schutz von Mensch und Umwelt genüge getan werden, auch der Arbeitsschutz und der weltweite Handel sollen dadurch verbessert werden. Unterschiedliche Regelungen für den Transport und den Umgang mit gefährlichen Chemikalien sollen aufgehoben werden. Die Einführung des neuen Systems erfolgt auf Empfehlung der UN und wird durch eine CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging) direkt in geltendes Recht umgesetzt. Dadurch wird die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen EU weit geregelt. Durch eine entsprechende und konsequente Information und Beschriftung der Chemikalien kann ein Schutz von Mensch und Umwelt in umfassender Weise etabliert werden. In Österreich ersetzt die CLP-Verordnung schrittweise die Stoff- und die Zubereitungsrichtlinie. Sie regelt die Einstufung der Chemikalien und soll somit für eine sichere Verwendung sorgen. Die Verordnung trat am 20.1.2009 für Stoffe und am 1.6.2015 für Gemische in Kraft. Bereits verpackte Produkte dürfen bis zwei Jahre nach in Kraft treten abverkauft werden. Durch ein neues System werden Chemikalien durch Gefahrentypen gekennzeichnet. Dies geschieht einerseits durch Abbildungen und eine Bezeichnung und andererseits durch ein Sicherheitsdatenblatt. Dadurch soll der Schutz der Gesundheit während der Handhabung, dem Transport und der Verwendung gewährleistet werden [35], [36].

Stoffe und Gemische werden in Gefahrenklassen eingeteilt. Diese sind in Übergruppen nach physikalisch chemische Gefahren, Gesundheitsgefahren, Umweltgefahren und weitere Gefahren zusammengefasst. Beispielsweise beinhaltet die Übergruppe der Gesundheitsgefahren folgende

Gefahrenklassen [37]:

- Akute Toxizität
- Ätz-/Reizwirkung auf die Haut
- Schwere Augenschädigung / Augenreizung
- Sensibilisierung der Atemwege oder der Haut
- Keimzellmutagenität
- Karzinogenität
- Reproduktionstoxizität
- Spezifische Zielorgantoxizität (einmalige Exposition / wiederholte Exposition)
- Aspirationsgefahr

Weiter werden die Gefahrenklassen in Gefahrenkategorien unterteilt. Zusätzlich werden Gefahrenhinweise, welche aus einem Buchstaben und drei Zahlen bestehen, angebracht und entspricht folgender Codierung [37], [38]:

- H2\*\* - physikalische Gefahren
- H3\*\* - Gesundheitsgefahren
- H4\*\* - Umweltgefahren

Die Produkte werden zudem optisch mit Gefahrenpiktogrammen gekennzeichnet, siehe Abb. 2.23. Diese sollen über die Schäden, welche ein bestimmter Stoff oder ein bestimmtes Gemisch der Gesundheit oder der Umwelt zufügen kann, informieren. Diese Piktogramme werden zusätzlich durch Signalwörter wie Achtung oder Gefahr unterstützt [37].



Abb. 2.23: Gefahrensymbole der CLP-Verordnung nach [37]

### 3 Ausgangsstoffe und Versuchsdurchführung

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Produkte beschrieben sowie Gefahren und den Umgang mit diesen. Die Rezeptur für die verwendeten Mischungen und die Standard Mischreihenfolge wird in Folge beschrieben.

#### 3.1 Verwendete Produkte und Gefahrenpotentiale

Bei der Herstellung von ultrahochfestem Beton kommen Chemikalien zum Einsatz, welche unter die CLP-Verordnung fallen, siehe 2.4 auf Seite 39. Diese Stoffe können bei Kontakt mit den Augen, der Haut und den Atemwegen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. Aus diesem Grund wird den Produkten ein Sicherheitsdatenblatt beigelegt, welches sowohl Lieferanten als auch dem Verwender die Gefahren aufzeigt und die notwendige Schutzausrüstung für den sicheren Umgang vorschreibt. Die wichtigsten Kenndaten der verwendeten Stoffe sowie Gefahrenpotentiale der einzelnen Komponenten werden in Folge beschrieben.

##### 3.1.1 Zement

Für die Herstellung der Mischungen im Zuge dieser Arbeit wird Portlandzement CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei der Firma Lafarge verwendet. Es handelt sich dabei um ein graues oder weißes geruchloses Pulver und einer Rohdichte von 3,13 g/cm<sup>3</sup> und einer Mahlfeinheit von 4.500 cm<sup>2</sup>/g. Der Zement zeichnet sich durch ausgezeichnete chemische Widerstandsfähigkeit, einem frühhochfestem Erhärtungsverhalten und geringe Wärmeentwicklung aus. Zusätzlich zeigt der Zement eine gute Verarbeitbarkeit bei geringem Wasserbedarf und eine gute Nachhärtung [39]. Der Zement, welcher zur Verwendung für die Industrie und den privaten Endverbraucher hergestellt wird, ist nach der CLP-Verordnung, wie in Tab. 3.1 dargestellt, eingestuft [40].

Entsprechende der Einstufung des Gemisches kann der Zement schwere Augenschäden und Hautreizungen verursachen. Das Produkt wird mit den Gefahrenpiktogrammen Ätzend und ernste Gesundheitsgefahr gekennzeichnet. Als Sicherheitshinweise sind alle Maßnahmen angeführt, welche die Gefahren verhindern oder die Auswirkungen mindern sollen. Es sind Schutzhandschuhe, Schutzkleidung, Augenschutz und Gesichtsschutz zu tragen. Bei Kontakt mit den Augen sind diese einige Minuten lang vorsichtig mit Wasser auszuspülen und der Arzt oder die Vergiftungszentrale ist zu kontaktieren. Bei Hautkontakt mit dem oben genannten Zement ist dieser mit viel Wasser und Seife abzuwaschen. Bei Hautreizung oder -ausschlag ist ein Arzt zu kontaktieren. Sollte das Gemisch in die Atemwege gelangen, ist die Person umgehend an die frische Luft zu bringen. Bei Unwohlsein ist ein Arzt oder die Vergiftungszentrale zu kontaktieren.

**Tab. 3.1:** Gefahrenpotentiale bei Zement

Gefahrenklasse	Gefahren- kategorie	Gefahren- hinweise	Wortlaut
Hautreizend	2	H 315	Verursacht Hautreizungen
Schwere Augenschädigung / -reizung	1	H 318	Verursacht schwere Augenschäden
Sensibilisierung der Haut	1 B	H 317	Kann allergische Hautreaktionen verursachen
Spezifische Zielorgan-Toxizität (STOT)-einmalige Explosion	3	H 335	Kann die Atemwege reizen

### 3.1.2 Mikrosilika

#### 3.1.2.1 "940"

Bei dem Mikrosilika mit der Kurzbezeichnung "940" handelt es sich um das Produkt Elkem MS Pulver Typ 940 U (SF) der Firma BASF Construction Solutions GmbH. Das Produkt weist einen SiO<sub>2</sub>-Gehalt von über 90 % und einer Dichte von 200 - 300 kg/m<sup>3</sup> [41].

Das Mikrosilika-Pulver "940" ist nach der CLP-Verordnung nicht einstufungspflichtig. Das Sicherheitsdatenblatt weist auf Maßnahmen bei Einatmen, Hautkontakt, Augenkontakt und Verschlucken hin. Beim Einatmen von Staub sind Ruhe, Frischluft und ärztliche Hilfe erforderlich. Bei Hautkontakt ist die betroffene Stelle mit Wasser und Seife zu reinigen. Im Falle von Augenkontakt ist dieses mit gespreizten Lidern 15 Minuten mit Wasser auszuspülen. Nach Verschlucken des Silikas ist der Mund auszuspülen und reichlich Wasser nach zu trinken. Maßnahmen für die Brandbekämpfung, bei unbeabsichtigter Freisetzung sowie Hinweise zur Entsorgung, Transport und umweltbezogene Angaben sind ebenfalls im Sicherheitsdatenblatt enthalten [42].

#### 3.1.2.2 "971"

Das Produkt Elkem Mikrosilika "971" wird von der Firma Elkem AS, Silicon Materials Undensified (nicht verdichtet) und Densified (verdichtet) hergestellt. Für die Versuche im Zuge dieser Arbeit wird 971-U (Undensified) verwendet. "971" weist einen SiO<sub>2</sub>-Gehalt von mindestens 98 % auf und besitzt einen pH-Wert von 5,5 - 7,5. Die Dichte des Mikrosilikas wird mit 250 - 300 kg/m<sup>3</sup> angegeben [43], [44].

Als Erste-Hilfe-Maßnahmen bei Inhalation, Hautkontakt und Augenkontakt sind frische Luft, waschen mit milder Seife und ausspülen der Augen mit Wasser oder Salzlösung vorgeschrieben. Der

Umgang mit dem Mikrosilika sollte mit Augenschutz, Handschuhen und Mundschutz erfolgen [44].

### 3.1.2.3 Microwhite

Microwhite wird von der Firma Elkem AS, Silicon Materials hergestellt. Microwhite weist einen  $\text{SiO}_2$ -Gehalt von mindestens 90 % und eine spezifische Oberfläche von mindestens  $15 \text{ m}^2/\text{g}$  auf [45], [46].

Das Produkt Microwhite fällt nicht in die CLP-Verordnung. Entsprechend gibt es keine Piktogramme, Signalworte oder Gefahrenklasse. Die Firma Elkem AS erstellte dennoch eine Sicherheitsinformation für das Produkt. Diese beziehen sich auf die Inhalation, den Hautkontakt und den Kontakt der Augen mit dem Produkt. Als Maßnahmen werden die Selben wie bei Mikrosilika "971" vorgeschlagen. Als persönliche Schutzausrüstung werden Schutzbrillen, Handschuhe und Mundschutz empfohlen. Die Vorgangsweisen bei Brand, Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung und Hinweise zur Handhabung und Lagerung werden ebenfalls in dieser Sicherheitsinformation beschrieben [46].

### 3.1.2.4 Slurry

Die volle Bezeichnung des Silikas Slurry lautet Elkem Microsilika slurry, EMSAC und wird von der Firma Elkem AS, Silicon Materials hergestellt und weist einen  $\text{SiO}_2$ -Anteil von mindestens 85 % auf. Die spezifische Oberfläche des Slurry liegt zwischen  $15 \text{ m}^2/\text{g}$  und  $35 \text{ m}^2/\text{g}$ . Da es sich bei Slurry um eine wässrige Mischung handelt, ist ein Mundschutz beim Umgang mit der Substanz nicht erforderlich. Bei Kontakt mit der Haut und den Augen wird abwaschen bzw. ausspülen empfohlen [47], [48].

### 3.1.2.5 Mapei

Mapeplast SF wird von der Firma MAPEI S.p.A. hergestellt. Als Kurzbezeichnung für dieses Mikrosilika wird Mapei verwendet.

Mapei fällt nicht unter die VLC-Richtlinie. Das Sicherheitsdatenblatt enthält mögliche Gefahren, Erste-Hilfe-Maßnahmen sowie Maßnahmen zur Brandbekämpfung, bei unbeabsichtigter Freisetzung und Hinweise zur Handhabung und Lagerung. Umweltbezogene Angaben, Hinweise zur Entsorgung und toxikologische Angaben sind ebenfalls Teil des Sicherheitsdatenblattes. Erste-Hilfe-Maßnahmen bei Haut- und Augenkontakt sind spülen und waschen mit Wasser. Bei Verschlucken soll sofort ein Arzt konsultiert werden. Beim Einatmen des Stoffes ist der Betroffene ins Freie zu bringen [49].

### 3.1.2.6 Sika

Das Mikrosilika SikaFume-HR/-TU mit der Kurzbezeichnung Sika wird von der Firma Sika Österreich GmbH hergestellt. Die wichtigsten Eigenschaften sind der Tab. 3.2 zu entnehmen.

Im Sicherheitsdatenblatt werden Erste-Hilfe-Maßnahmen bei Einatmen, Hautkontakt, Augenkontakt und Verschlucken beschrieben. Diese gleichen den bereits bei den anderen Mikrosilika beschriebenen Vorgangsweisen. Zusätzlich wird auf die Lagerbedingungen und Schutzmaßnahmen für eine sichere Handhabung eingegangen [50].

### 3.1.2.7 Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften der einzelnen Mikrosilika

**Tab. 3.2:** Eigenschaften der verwendeten Mikrosilika nach [41], [44], [43], [46], [48], [49], [50]

	940	971	Microwhite	Slurry	Mapei	Sika
Aussehen	Pulver	Feinststaub + Agglomerate	Feinststaub + Agglomerate	Slurry	Pulver	Pulver
Farbe	grau	grau - weißlich	grau - weißlich	grau	grau	grau
Dichte in kg/m <sup>3</sup>	200 - 350	250 - 350	150 - 700	-	2650	2300
Spez. Oberfl. in m <sup>2</sup> /g	-	15 - 30	15 - 30	15 - 30	-	-

### 3.1.3 Fließmittel

MaterGlenium ACE 430 (früher Glenium ACE 430) der Firma BASF Performance Products GmbH kommt als Fließmittel zum Einsatz. Die braune Flüssigkeit zeigt gute Verflüssigungseigenschaften und sorgt für eine frühere Hydratationsreaktion. Durch die Wärmeentwicklung erfolgt eine rasche Frühfestigkeitsentwicklung. Der pH-Wert der Flüssigkeit liegt zwischen 4,5 und 6,5 und die Dichte bei ca. 1,06 g/cm<sup>3</sup> [51].

Das Produkt, eine braune, schwach riechende Flüssigkeit, ist nach der CLP-Verordnung nicht einstufungspflichtig und nicht kennzeichnungspflichtig, es können jedoch Allergien verursacht werden. Sowohl der Augen-, als auch der Hautkontakt und das Einatmen soll vermieden werden [52].

### 3.1.4 Konsistenzhalter

Als Konsistenzhalter wird für die Versuche dieser Arbeit MasterSure 991 (früher Glenium SKY 911) der Firma BASF Performance Products GmbH verwendet. Die grüne Flüssigkeit wird mit 0,1 % bis 1,5 % des Bindemittelgewichts dosiert und trägt zu einer guten Konsistenzhaltung bei.

Die Anfangsverflüssigung wird nur gering beeinflusst. Die Dichte des Konsistenzhalters beträgt ca.  $1,04 \text{ g/cm}^3$  und der pH-Wert liegt bei 4,5 - 6,5 [53].

Der Konsistenzhalter von BASF ist nach der CLP-Verordnung nicht einstufungspflichtig. Haut- und Augenkontakt mit der grünen Flüssigkeit soll vermieden werden, ebenso wie verschlucken und einatmen [54].

### 3.1.5 Entlüfter

Für die genannten Mischungen kommt der Entlüfter MasterFinish DF 370 (früher DCC-Entlüfter) der Firma BASF Performance Products GmbH zum Einsatz. Die gelblich, milchig Trübe Emulsion steigert die Tendenz des Frischbetons, vorliegende Grob- und Feinluft auszutreiben. Die Unterstützungswirkung erfolgt sowohl während des Mischvorgangs als auch beim Einbau und der Verdichtung. Der pH-Wert von MasterFinish DF 370 liegt bei 5 - 7 und die Dichte beträgt  $1,04 \text{ g/cm}^3$  bis  $1,08 \text{ g/cm}^3$  [55].

Die flüssige, gelbliche Emulsion ist nach den GHS-Kriterien nicht einstufungspflichtig. Bei ungenügender Belüftung des Arbeitsplatzes ist ein Atemschutz zu tragen. Um den Kontakt mit dem Produkt zu vermeiden, sind Handschuhe, eine Schutzbrille und eine leichte Schutzbekleidung zu tragen [56].

### 3.1.6 Quarzmehl

Für die Mischungen im Zuge dieser Arbeit wurde das Quarzmehl mit einer Mahlfeinheit 10000 der Amberger Kaolinwerke verwendet. Der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt beträgt 97 % und die Schüttdichte des Quarzmehls liegt bei 900 kg [57].

### 3.1.7 Quarzsand

Der verwendete Quarzsand Haltern H 32 wird von der Firma Quarzwerke GmbH hergestellt. Es handelt sich dabei um aufbereitete Sande mit einem  $\text{SiO}_2$ -Gehalt von über 99 %. Der mittlere Korndurchmesser beträgt 0,32 mm [58].

## 3.2 Rezeptur

Bei der Herstellung des Frischbetons wird für alle Mischungen das selbe Grundrezept verwendet, siehe Tab. 3.3. Diese Rezepturen für "940", "971", Microwhite, Mapei und Sika unterscheiden sich nur durch die Verwendung dieser verschiedenen Mikrosilika, das Massenverhältnis sowie die Mischreihenfolge unterscheiden sich nicht. Die Mischung mit Slurry weicht von dieser Rezeptur ab. Da Slurry ein Gemisch aus Wasser und Mikrosilika ist, wird das Zugabewasser reduziert. Der

Slurry wird mit einem Massenverhältnis von 50 % Wasser und 50 % Mikrosilika geliefert. Dadurch wird fast das gesamte benötigte Wasser der Mischung mit dem Slurry zugeführt. Auf den Einfluss auf die Mischreihenfolge bei der Verwendung von Slurry wird in Kapitel 3.3 eingegangen. Jede Rezeptur wurde zwei mal gemischt, um einen besseren Vergleich der Daten zu gewährleisten. Diese werden in der weiteren Arbeit mit 1. Mischung bzw. M1 und 2. Mischung bzw. M2 angesprochen.

**Tab. 3.3:** Frischbetonrezeptur unter Berücksichtigung der verschiedenen Mikrosilika

	940, 971, Microwhite, Mapei, Sika	Slurry
Wasser	517,9 g	0,1 g
Zement	2226,5 g	2226,5 g
Mikrosilika	517,5 g	1035,6 g
Fließmittel	100,2 g	100,2 g
Konsistenzhalter	44,5 g	44,5 g
Entlüfter	3,2 g	3,2 g
Quarzmehl	1113,3 g	1113,3 g
Sand	2968,0 g	2968,0 g
<b>Summe</b>	<b>7491,1 g</b>	<b>7491,4 g</b>

### 3.3 Standard Mischreihenfolge

Für alle Mischungen dieser Versuchsreihe wurde der Mischertyp Eirich R 02 Vac verwendet. Die Standard-Mischreihenfolge ist Tab. 3.4 zu entnehmen.

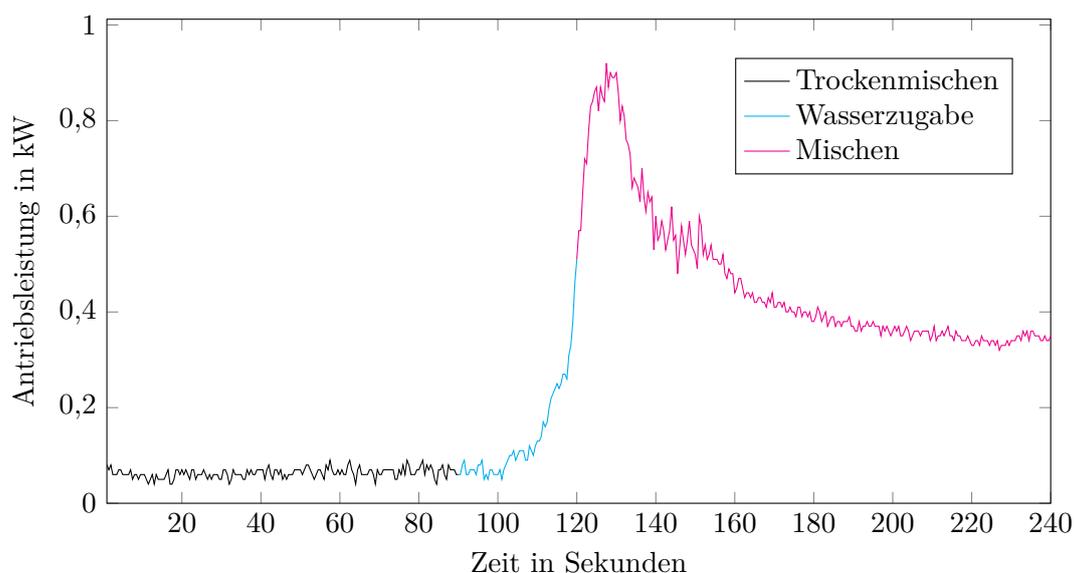
**Tab. 3.4:** Standard-Mischreihenfolge

Mischreihenfolge	Dauer in Sekunden	Wirbler in U/min
Cem, MS, QM, QS, Fasern	90	1200
Wasser+FM+DCC	30	1200
Mischen	120	1200
Summe	240	

Für die Versuche mit dem Silika Slurry wurde die Standard-Mischreihenfolge geringfügig abgeändert. Da beim Slurry das Mikrosilika bereits mit Wasser vermennt ist, wurden der Zement, das Quarzmehl und der Quarzsand ohne Mikrosilika 90 Sekunden trocken gemischt. Das Silika

wurde jeweils mit dem Wasser beigemischt. Bei den Mischungen mit Mikrosilikaprodukten Micorwhite und Sika wurde die Dauer des Mischens verlängert, da die Konsistenz nach dem 4 minütigen Mischvorgang noch nicht erreicht war. Die Dauer der jeweiligen Mischungen wird in Kapitel 4.3 in Tab. 4.3 dargestellt.

Abb. 3.1 zeigt beispielhaft den Verlauf der Antriebsleistung des Mixers. Zu Beginn werden die festen Bestandteile (Zement, Mikrosilika, Quarzmehl und Quarzsand) trocken gemischt. Für die Versuche im Zuge dieser Arbeit wurden keine Fasern verwendet. Die Trockenmischzeit betrug bei allen Versuchen 90 Sekunden. Ab diesem Zeitpunkt wurden über 30 Sekunden die Flüssigkeiten zugegeben. In der Abbildung ist an dem blauen Abschnitt der Kurve gut zu erkennen, dass sich die Leistung kurz nach Beginn der Zugabe erhöht. Nach Ende der Zugabe der Flüssigkeiten steigt die Leistungskurve weiter an. Die Leistung fällt nach einem Hochpunkt wieder kontinuierlich ab und nähert sich einer Horizontalen an.



**Abb. 3.1:** Darstellung der Bereiche einer Mischkurve

## 4 Versuche und Auswertung

In diesem Kapitel erfolgt eine Auswertung der Partikelgrößenverteilung sowie die Berechnung der Packungsdichte. Die notwendige Mischleistung und die Stabilisationszeit der einzelnen Rezepturen werden gegenübergestellt und interpretiert, so wie die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Mithilfe dieser Kennwerte soll auf die Anwendungsgebiete sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Mischungen, welche sich ausschließlich durch das verwendete Mikrosilika unterscheiden, eingegangen werden.

### 4.1 Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung der einzelnen Stoffe wurde mit der Hydro-Nassdispergiereinheit des MASTERSIZER 3000 gemessen. Dabei handelt es sich um ein optisches Messsystem, welches mittels Laserbeugung die Partikelgrößenverteilung einer Probe bestimmt. Es wurden im Labor Zement-, Sand-, Quarzmehl- und Mikrosilikaprobe genommen und diese mit dem MASTERSIZER gemessen.

Für die Messung der Partikelgrößenverteilung der Mikrosilika wurden diese in destilliertem Wasser dispergiert (10 g Mikrosilika, 30 g Wasser) und mit Ultraschall beaufschlagt, um die deagglomeration der Silica durch den Energieeintrag und die Mahlwirkung der anderen Feststoffe im Gemisch zu simulieren.

#### Zement, Quarzsand und Quarzmehl

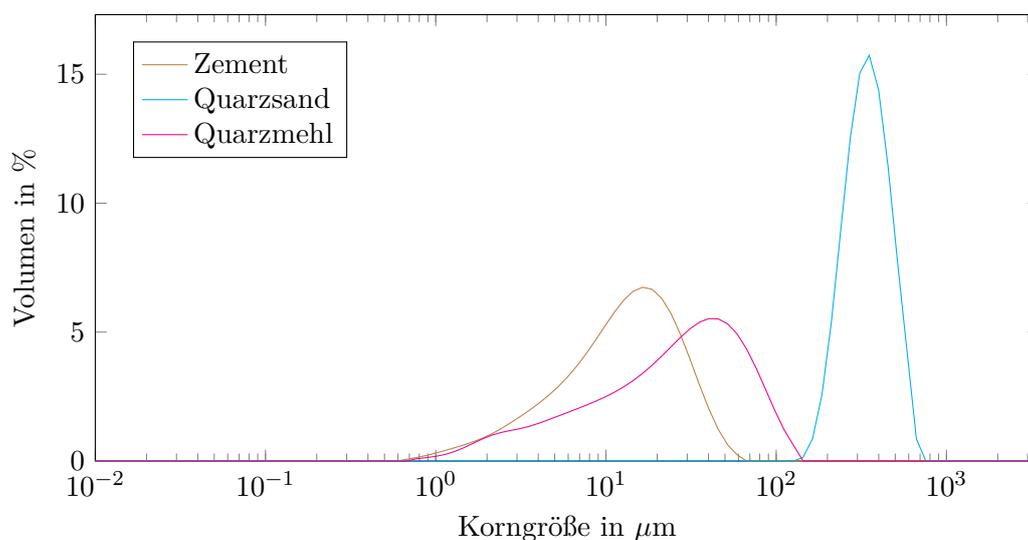


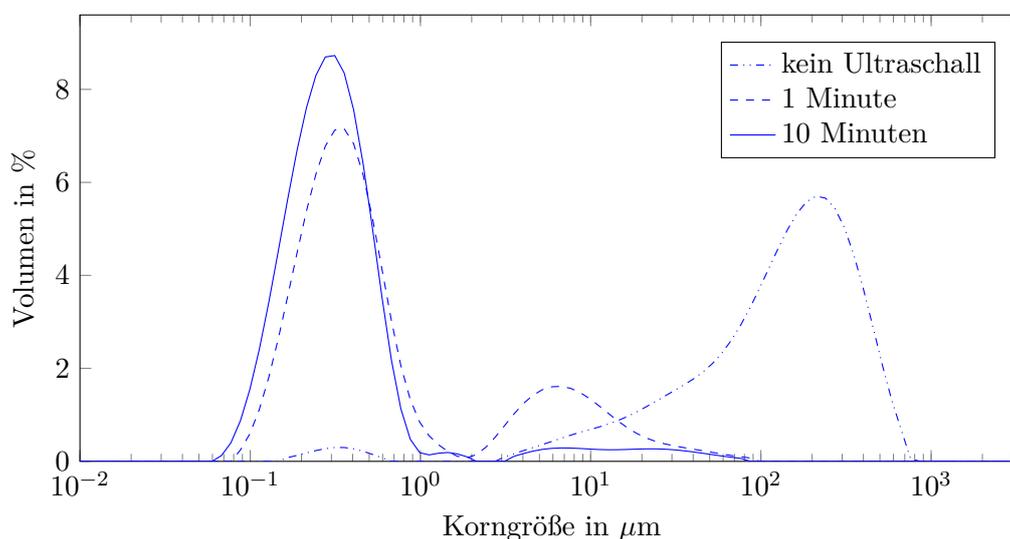
Abb. 4.1: Veränderung der Partikelgrößenverteilung von Zement, Quarzsand und Quarzmehl

Abb. 4.1 zeigt die Partikelgrößenverteilung von Zement, Quarzsand und Quarzmehl. Der Quarzsand zeigt eine sehr enge Stufung zwischen 0,126 mm und 0,756 mm. Der Zement weist kleinere Partikel mit einer weiten Stufung von 0,66  $\mu\text{m}$  bis 66,90  $\mu\text{m}$  auf. Es ergibt sich dadurch keine Überschneidung der Korngrößen des Zements mit dem Sand. Das Quarzmehl bildet mit einer Stufung von 0,675  $\mu\text{m}$  bis 0,144 mm fast den gesamten Bereich des Zements ab, ist jedoch weiter gestuft und weist bei den großen Korngrößen einen Übergang zum Sand auf.

### Mikrosilika

Für die Messung der Mikrosilika wurde das jeweilige Produkt ohne die Beaufschlagung mit Ultraschall gemessen. Dies soll zeigen, mit welcher Verteilung das jeweilige Silika vor einem Energieeintrag, wie beispielsweise der Mischvorgang, vorliegt. Im Anschluss wurden die jeweiligen Silica mit destilliertem Wasser gemischt und mit Ultraschall jeweils eine und zehn Minuten beaufschlagt. Die Messungen zeigen, dass sich die Agglomerate meist nach kurzer Einwirkung zu lösen begannen. Bei längerer Einwirkung lösten sich bei fast allen Mikrosilika die Agglomerate beinahe vollständig.

### Mikrosilika "940"



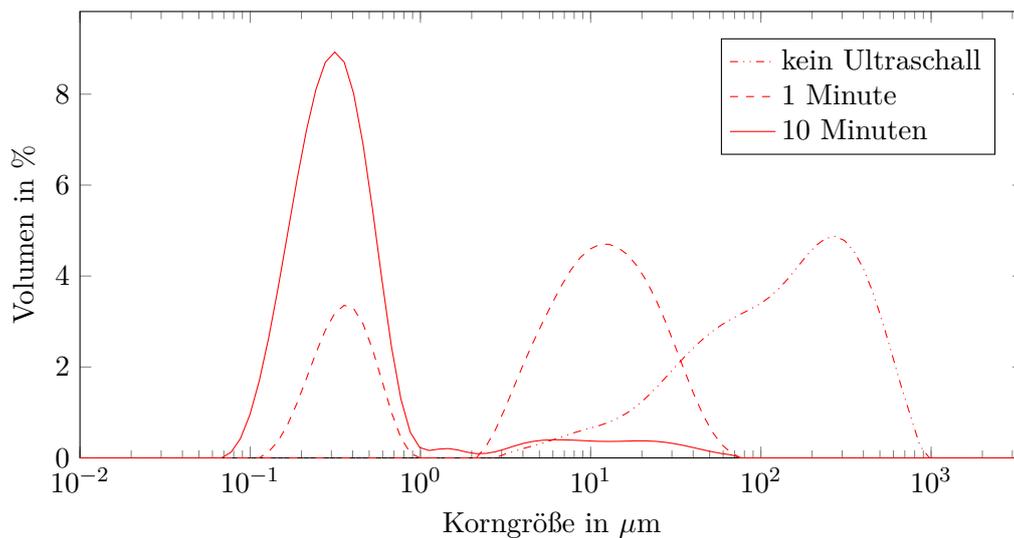
**Abb. 4.2:** Veränderung der Partikelgrößenverteilung des Mikrosilikas "940" unter bei Ultraschall

Die Partikelgrößenverteilung des Mikrosilikas "940" in Abb. 4.2 zeigt, dass ohne Ultraschall, also vor Beginn eines Energieeintrages, der Großteil der Partikel eine Größe zwischen 2,75  $\mu\text{m}$  und 0,859 mm aufweisen. Ein kleiner Anteil des Gesamtvolumens lag bereits in den Größenordnungen

nach Ultraschall vor. Bereits nach einer Minute externen Ultraschall ist gut zu erkennen, dass die Bindungen in den Partikeln, welche größer als  $0,098 \mu\text{m}$  waren, aufbrachen und sich die Verteilung stark in Richtung der kleineren Partikel hin verschiebt. Nach einer Ultraschalleinwirkung von zehn Minuten liegt nur mehr ein kleiner Teil von Partikel mit einer Korngröße größer als  $3,124 \mu\text{m}$  vor. Die Agglomerate brechen beim Silica "940" bei einem Energieeintrag schnell auf, was darauf hinweist, dass dies auch beim Mischen geschieht. Dieser Effekt kann auf kleinere Mischleistung und eine höhere Packungsdichte als bei anderen Silika hinweisen.

### Mikrosilika "971"

Das Mikrosilika "971" zeigt in Abb. 4.3 ohne Ultraschall fast die selben Korngruppen wie "940", jedoch eine andere Verteilung innerhalb dieser.

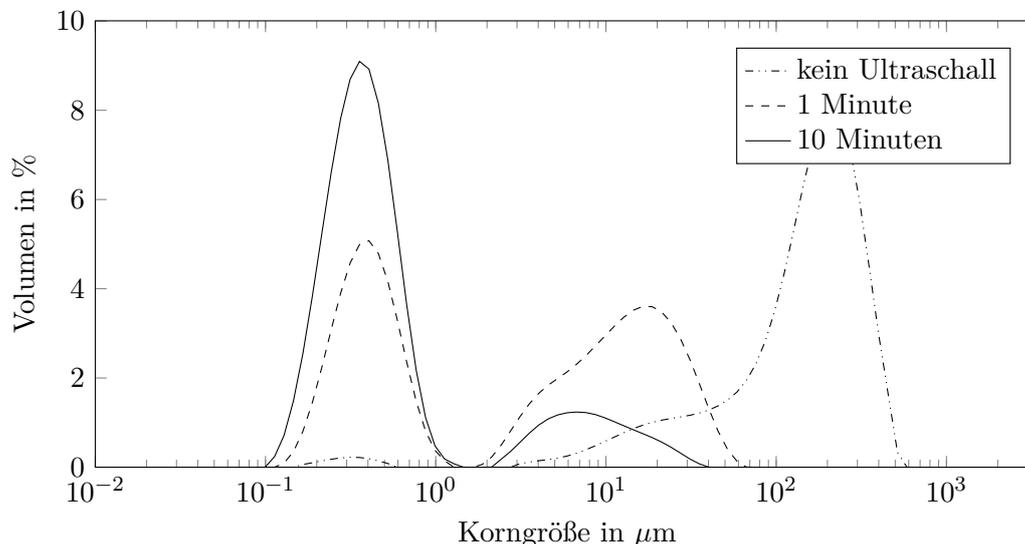


**Abb. 4.3:** Veränderung der Partikelgrößenverteilung Mikrosilikas "971" unter bei Ultraschall

Bei "971" liegt ein größeres Volumen der kleineren Korngruppen als bei "940" vor. Nach einer Minute Ultraschall zeigen sich zwei charakteristische Kornanhäufungen mit Maxima bei  $0,357 \mu\text{m}$  und bei  $12,726 \mu\text{m}$ . Die beiden Anhäufungen sind durch einen Bereich getrennt, wo in mehreren Korngruppen keine Partikel vorliegen. Es ist im Vergleich gut zu erkennen, dass bei "971" nach einer Minute weniger Agglomerate aufgebrochen sind als bei "940". Nach zehn Minuten Ultraschall weisen die beiden Kurven mit "940" und "971" beinahe die selbe Verteilung auf. Das Maximum der Kornanhäufung liegt bei einer geringfügig höheren Kornklasse als bei "940" und das Volumen der restlichen Agglomerate ist etwas höher.

### Mikrosilika Microwhite

Die Partikelgrößenverteilung des Mikrosilikas Microwhite in Abb. 4.4 zeigt ohne Ultraschall eine enger gestufte Verteilung der größeren Partikel.

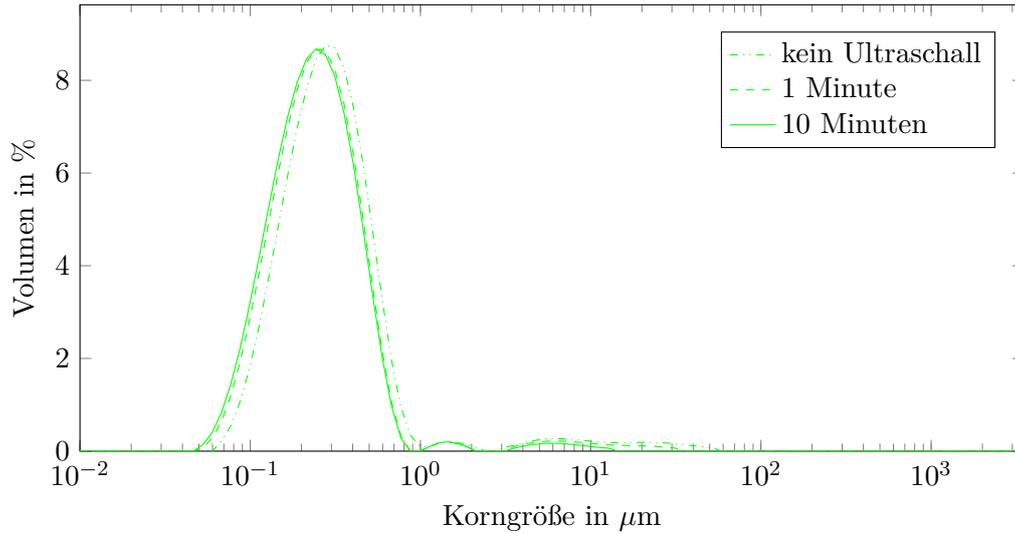


**Abb. 4.4:** Veränderung der Partikelgrößenverteilung Mikrosilikas Microwhite unter bei Ultraschall

Es liegt bereits ein kleines Volumen des unbehandelten Silicas in den Korngruppen zwischen 0,146  $\mu\text{m}$  und 0,594  $\mu\text{m}$  vor. Nach einer Minute Ultraschall zeigt sich, dass sich die maximale Korngröße von 586,001  $\mu\text{m}$  auf 66,897  $\mu\text{m}$  vermindert hat und sich das Volumen der deagglomerierten Partikel vergrößert hat. Im Vergleich mit "940" zeigt Microwhite weniger Partikel im deagglomerierten Bereich und mehr Volumen im Korngrößenbereich der noch nicht aufgebrochenen Agglomerate. Nach einem zehn minütigen Ultraschall weist die Mischung eine Kornanhäufung im Bereich von 0,100  $\mu\text{m}$  und 1,453  $\mu\text{m}$  auf, diese entspricht in etwa der Kornanhäufung beim Sika "940". Im Bereich der größeren Korngrößen liegt mehr Volumen vor als beim Mikrosilika "940".

### Mikrosilika Slurry

Die Verteilung der Partikelgrößen vom Mikrosilika Slurry in Abb. 4.5 weicht wesentlich von den anderen Verteilungen ab. Ohne die Beaufschlagung mit Ultraschall weist Slurry bereits eine Kornanhäufung mit dem Maxima bei 0,276  $\mu\text{m}$  auf. Das Volumen größerer Partikel ist sehr gering, was bedeutet, dass kaum Agglomerate vorliegen. Nach einer Minute Ultraschall zeigt sich eine geringfügige Volumsvergrößerung bei kleinen Korngrößen. Ein Unterschied der Kurven nach einer und zehn Minuten Ultraschall ist kaum zu erkennen. Bei den größeren Kornfraktionen ist zu sehen,

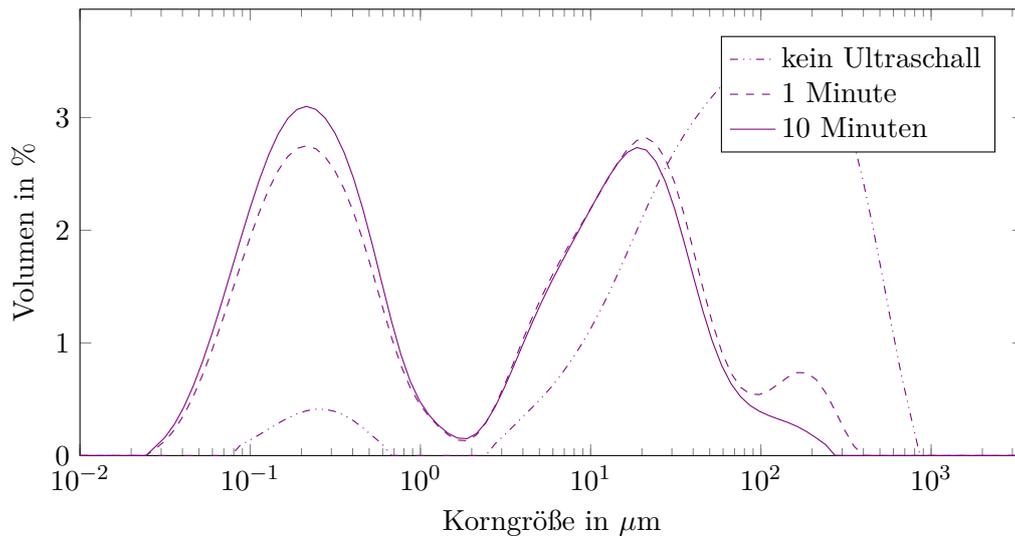


**Abb. 4.5:** Veränderung der Partikelgrößenverteilung Mikrosilikas Slurry unter bei Ultraschall

dass die wenigen Agglomerate, welche in der Suspension vorliegen, durch die Beaufschlagung mit Ultraschall verringert werden. Mit dieser Partikelgrößenverteilung sollte sich die größte Packungsdichte einstellen. Ebenso sollten Mischungen mit Slurry ein großes Ausbreitmaß und eine kurze Trichterauslaufzeit aufweisen.

### Mikrosilika Mapei

Die Partikelgrößenverteilung des Silicas Mapei zeigt in Abb. 4.6 ohne Ultraschall keinen ausgeprägten Hochpunkt.



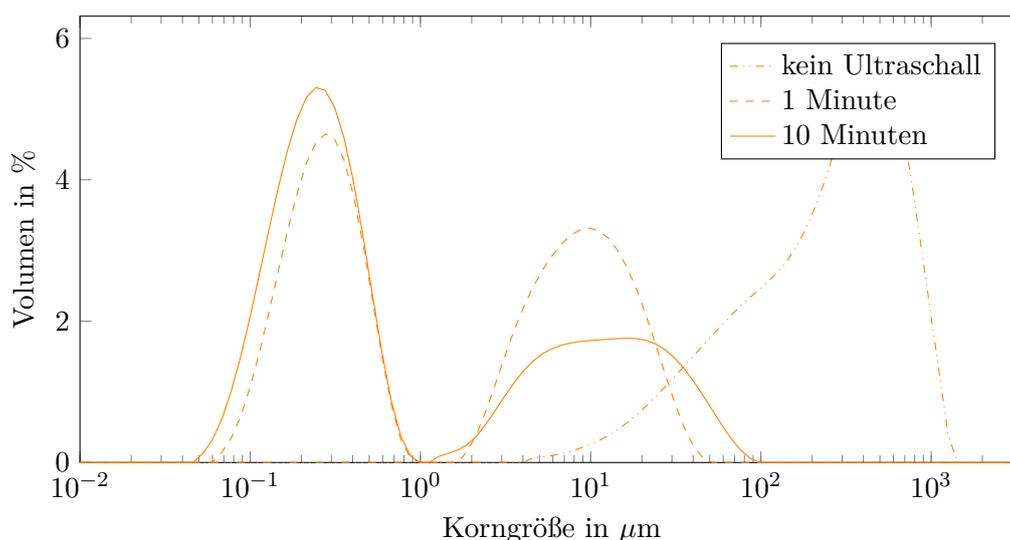
**Abb. 4.6:** Veränderung der Partikelgrößenverteilung Mikrosilikas Mapei unter bei Ultraschall

Der maximale Korndurchmesser liegt bei 0,859 mm. Dieser ist geringfügig größer als jener bei

"940". Bei Mapei liegt bereits ein kleiner Teil des Volumens ohne Einwirkung von Ultraschall im Bereich von  $0,077 \mu\text{m}$  bis  $0,675 \mu\text{m}$  vor. Die Ultraschallbeaufschlagung weist bei Mapei eine geringere Wirkung bezüglich des Aufbrechens der Agglomerate auf als bei den bisher betrachteten Silica. Nach zehn Minuten Ultraschall zeigen sich zwei Partikelanhäufungen mit ähnlichen Volumen. Mapei zeigt im Vergleich die kleinsten Korndurchmesser aller Mikrosilika. Durch das relativ große Volumen der nicht aufgebrochenen Agglomerate ist eine höhere Packungsdichte zu erwarten. Es ist zu beobachten, ob sich der Anteil der sehr kleinen Partikel positiv auf die Packungsdichte und die Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirkt.

### Mikrosilika Sika

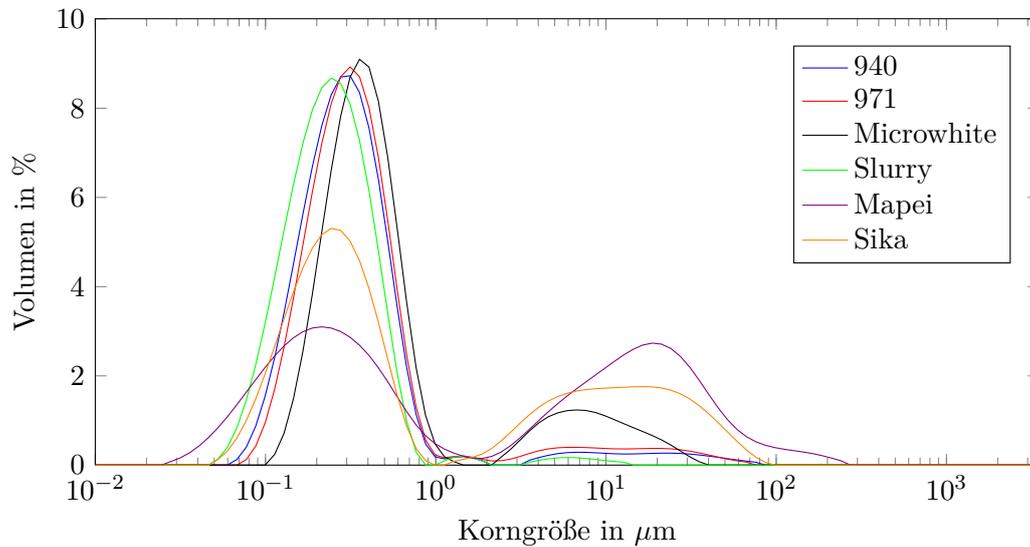
Abb. 4.7 zeigt die Partikelgrößenverteilung des Mikrosilikas Sika vor und nach der Beaufschlagung mit Ultraschall.



**Abb. 4.7:** Veränderung der Partikelgrößenverteilung Mikrosilikas Mapei unter bei Ultraschall

Ohne Ultraschallbeaufschlagung weist Sika ein Größtkorn von  $1,432 \text{ mm}$  und keinen Feinanteil auf. Nach einer Minute Ultraschall zeigt sich eine Verschiebung der Verteilung hin zu den kleineren Fraktionen. Es bilden sich zwei Anhäufungen mit Maxima bei  $0,276 \mu\text{m}$  und  $9,858 \mu\text{m}$ . Nach weiterer Ultraschallbeaufschlagung zeigt sich ein abflachen der Partikelanhäufung mit den größeren Korngrößen und eine Volumenzunahme bei den kleineren Fraktionen. Für das Aufbrechen dieses Mikrosilikas ist ein großer Energieeintrag notwendig. Aufgrund der Partikelgrößenverteilung ist eine höhere Mischleistung und eine geringe Packungsdichte zu erwarten.

### Überblick über die Korngrößenverteilungen der Mikrosilika

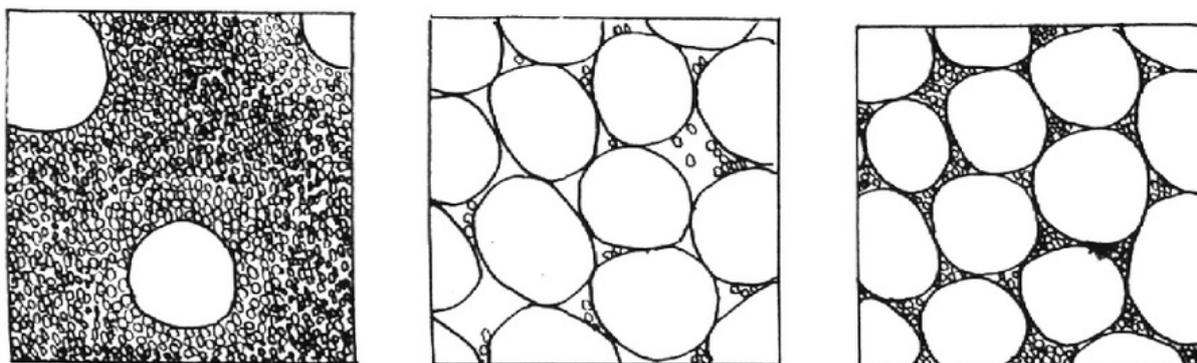


**Abb. 4.8:** Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Mikrosilika nach zehn Minuten Ultraschall

Der Vergleich aller Mikrosilika nach zehn Minuten Ultraschall ist in Abb. 4.8 zu sehen. Bei jedem Silica sind zwei Partikelanhäufungen zu erkennen. Die linken Anhäufungen mit den kleineren Korndurchmessern ist bei allen Silica größer als die rechten Anhäufungen mit den größeren Partikeln. In diesem Vergleich, verbunden mit den Abb. 4.2 bis Abb. 4.7 zeigt sich, dass der Energieeintrag durch den Ultraschall einen wesentlichen Einfluss auf die Kornverteilung des Materials hat. Der Effekt ist am stärksten beim Silica "940" sichtbar. Mapei benötigt den höchsten Energieeintrag für das aufbrechen der Agglomerate. Es ist anzunehmen, dass die Erkenntnisse aus der Partikelgrößenverteilung und dem Verhalten unter Ultraschalleinwirkung Aufschlüsse über das Verhalten der Mischung geben, da die Silica die einzige Komponente der Rezeptur ist, welche variiert wurde. Es ist zu erwarten, dass die Mischungen mit "940", "971" und Slurry bei der Packungsdichte und dem Ausbreitmaß hohe Werte, bei der Trichterauslaufzeit und dem Fließmoment niedrige Werte aufweisen, da diese Mikrosilika jeweils im überwiegenden Anteil Partikel im Bereich von  $0,046 \mu\text{m}$  bis  $2,131 \mu\text{m}$  aufweisen. Durch den großen Anteil an großen Partikeln bei Mapei und Sika ist eine geringere Packungsdichte zu erwarten als bei den anderen Mischungen. Microwhite weist bei den kleineren Partikeln eine enger gestufte Anhäufung und bei den größeren Partikeln einen größeren Anteil als bei "940", "971" und Slurry auf. Es ist in Folge zu beobachten, wie sich die Mischleistung, die Packungsdichte sowie die Frisch- und Festbetoneigenschaften bei diesem Silica verhalten.

## 4.2 Packungsdichte

Die Bestimmung der Packungsdichte erfolgt nach der Methode nach *Schwander*. Mithilfe seines Rechenmodells kann von einer Kornverteilung der Hohlraumgehalt bestimmt werden. Dazu ist es erforderlich, die einzelnen Stoffe der Mischung durch die Verteilungsfunktionen und die Art des Kornes zu beschreiben. In einem grundlegenden Modell, bei dem ein Grundkorn vorliegt, dessen Hohlräume mit einem Beikorn ausgefüllt werden sollen, kann zwischen zwei Fällen unterschieden werden. Im einen Fall liegen nicht genug Beikörner vor, um die Hohlräume zwischen der Grundkornpackung zu füllen und es bleibt ein Hohlraum (Abb. 4.9, mittleres Bild). Im anderen Fall ist der Anteil des Beikorns größer als jener des Grundkorns, dabei werden die größeren Körner auseinander gedrängt (Abb. 4.9, linkes Bild). In diesem Fall ergibt sich der Hohlraumgehalt des Gemisches als jener der feineren Körnung. Der geringste Hohlraumgehalt ergibt sich folglich, wenn die beiden Gleichungen zur Berechnung der Fälle das gleiche Ergebnis liefern, diesen Fall zeigt Abb. 4.9 im rechten Bild [62].



**Abb. 4.9:** Einfluss verschiedener Volumsverhältnisse auf die Packungsdichte nach [13]

Jedem Stoff werden zusätzlich zwei Kennwerte zugeschrieben. Der erste Faktor, beschreibt die Reichweite der Teilchenbehinderung  $w_0$ . Er ergibt sich durch das Verhältnis der Durchmesser der Körner sowie der Form und Oberflächenbeschaffenheit. Der Kennwert gibt an, dass es ab einem Grenzwert des Korngrößenverhältnisses zu einer gegenseitigen Behinderung und somit zu einer Volumsvergrößerung kommt. Der zweite Kennwert gibt einen Faktor für den Hohlraumgehalt  $k_0$  des einzelnen Kornes an[62]. Die Faktoren werden aus der Arbeit von *Stangl* [62] übernommen (Tab. 4.1).

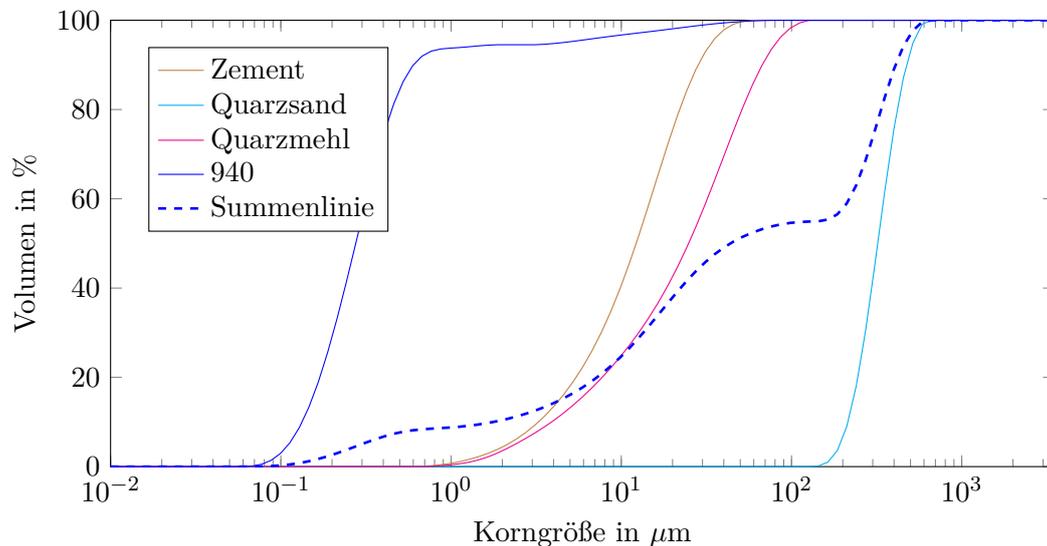
Für die Kornverteilung der einzelnen Komponenten werden die Werte der Untersuchungen aus

**Tab. 4.1:** Werte für den Kornformfaktor  $k_0$  und die Teilchenbehinderung  $w_0$  nach *Stangl* [62]

	Zement	Quarzmehl	Quarzsand	Mikrosilika
$k_0$	1,034	1,158	0,65	2,223
$w_0$	2,510	2	1,6	1,67

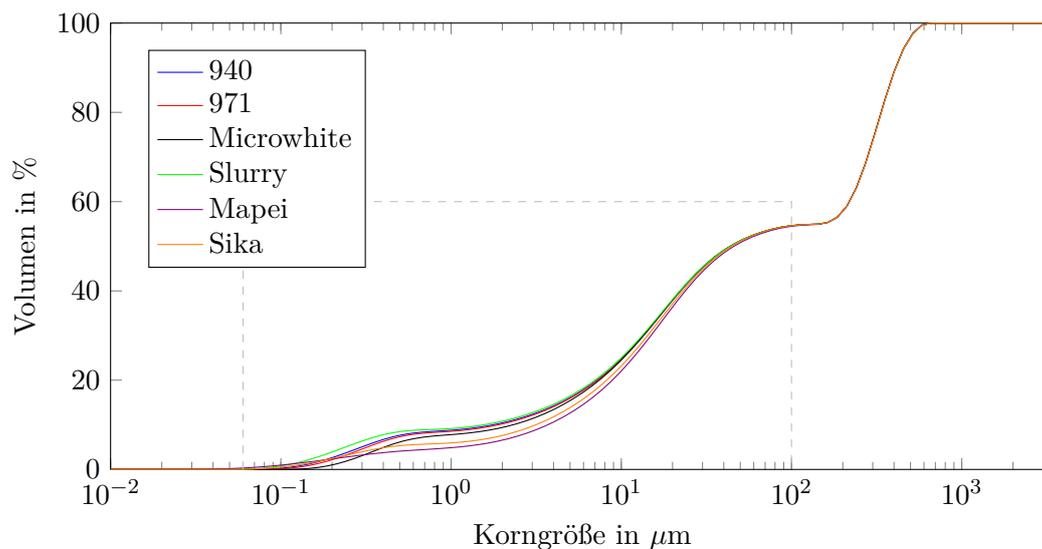
Kapitel 4.1 auf Seite 50 herangezogen. Die Berechnung der Packungsdichte erfolgt für jedes Silica für drei Zustände: ohne, mit einer Minute und mit zehn Minuten Ultraschall.

Aus der Überlagerung der Komponenten einer Mischung ergibt sich die Summenlinie der Kornverteilung. Diese wird in Abb. 4.10 beispielhaft an der Mischung mit "940" nach zehn Minuten Ultraschall dargestellt.

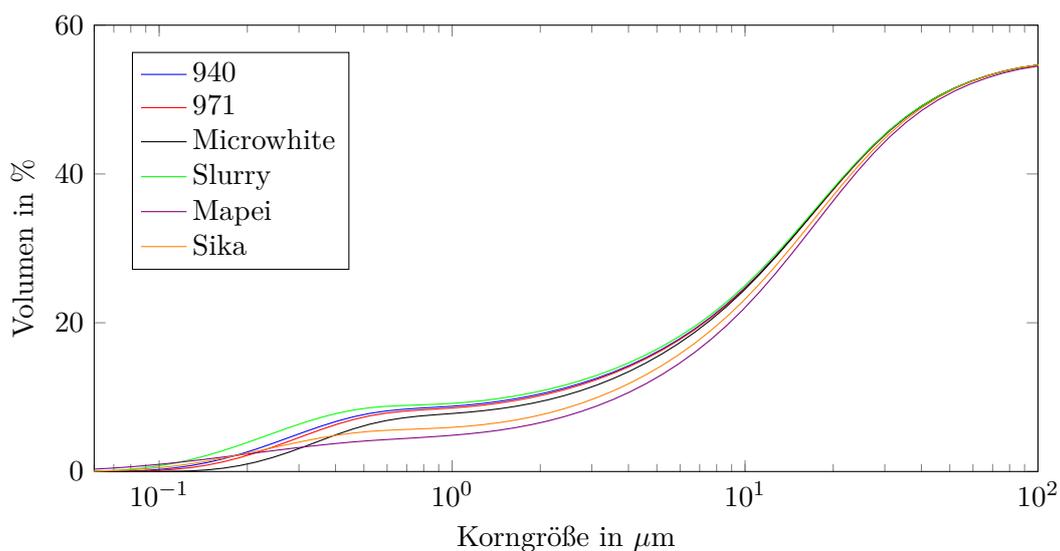
**Abb. 4.10:** Summenlinie der Korngrößenverteilung bei der Mischung mit "940" nach zehn Minuten Ultraschall

Für den Vergleich der einzelnen Mischungen werden die Summenlinien herangezogen, siehe Abb. 4.11. Für die Silika wurde jeweils die Korngrößenverteilung nach zehn Minuten Ultraschall betrachtet.

Da die Abweichungen der Summenlinie im Einflussbereich der Mikrosilika (Korngrößen  $10^{-1}$  –  $10^2$  µm) auftreten, wird in Abb. 4.12 dieser Bereich genauer betrachtet. In dieser Vergrößerung ist gut zu erkennen, dass die Mischung mit Mapei die kleinsten Korngrößen aufweist, jedoch in Summe weniger Feinstoffanteil besitzt als die anderen Mischungen. Den größten Feinstoffanteil weist die Mischung mit Slurry auf, was bereits aus dem Vergleich der Partikelgrößenverteilung



**Abb. 4.11:** Summenlinie der Korngrößenverteilung aller Mischungen mit den verschiedenen Mikrosilika nach zehn Minuten Ultraschall



**Abb. 4.12:** Ausschnitt der Summenlinien aus Abb. 4.11

hervorgeht. "940" und "971" weisen eine geringe Abweichung auf. Microwhite weist bis  $0,100 \mu\text{m}$  keine Partikel auf. Ab etwa  $0,3 \mu\text{m}$  übersteigt die Summenlinie der Mischung mit Microwhite jedoch die von den Mischungen mit Mapei und Sika.

Für jede Mischung wurde die Packungsdichte berechnet. In Tab. 4.2 sind alle Packungsdichten mit den jeweiligen Silica mit und ohne Ultraschalleinwirkung auf das jeweilige Silica angeführt. Es ist gut zu erkennen, dass die Mischung mit Slurry bereits ohne Ultraschall eine sehr hohe Packungsdichte aufweist. Nach zehn Minuten Ultraschall steigert sich die Packungsdichte nur

**Tab. 4.2:** Berechnete Packungsdichte in Prozent mit verschiedenen Mikrosilika

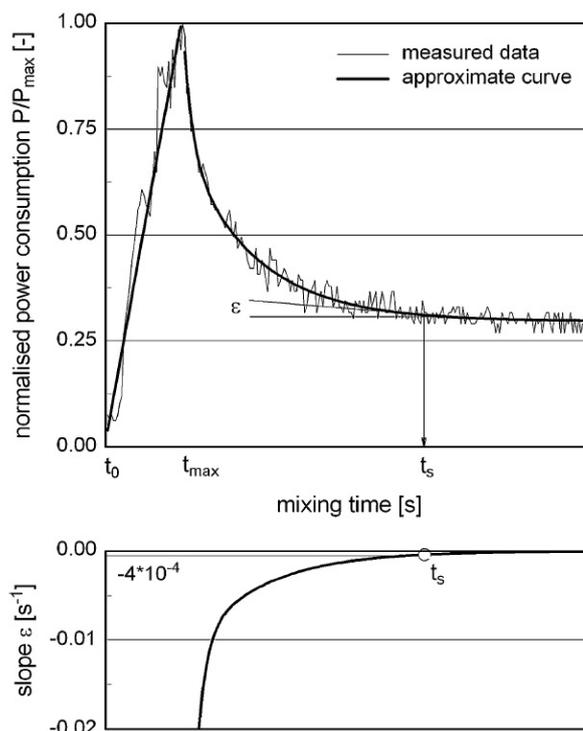
	940	971	MW	Slurry	Mapei	Sika
kein Ultraschall	65,5	65,3	65,5	71,2	65,4	65,7
1 Minute	69,9	66,6	67,5	71,5	67,8	68,3
10 Minuten	71,1	70,9	70,1	71,6	68,2	69,1

mehr um 0,4 %. Die Mischungen mit den anderen Mikrosilika weisen ohne Ultraschall eine Packungsdichte zwischen 65,3 % und 65,7 % auf und sind also nahezu ident. Nach einer Minute Ultraschall ist gut zu erkennen, dass die Packungsdichte bei der Mischung mit "940" am stärksten angestiegen ist. Dies deckt sich mit den Beobachtungen des Verhaltens der Partikelgrößenverteilung bei Ultraschalleinwirkung. Nach zehn Minuten Ultraschall liegt die Packungsdichte der Mischung mit "940" nach wie vor hinter der Mischung mit Slurry. Die Mischungen mit "971" und Microwhite erreichen nach zehn Minuten Ultraschall auch eine Packungsdichte über 70 %. Die Mischung mit Mapei zeigt mit 68,18 % die geringste Packungsdichte nach zehn Minuten Ultraschall. Dieses Ergebnis, zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Partikelgrößenverteilung. "940", "971", Microwhite und Slurry wiesen alle eine ähnlich große Anhäufung von Partikeln im Messbereich zwischen  $0,05 \mu\text{m}$  und  $1,0 \mu\text{m}$  auf. Das Maxima der Kurve mit Slurry wies die geringste Korngröße auf, gefolgt von "940", "971" und Microwhite. Diese Reihenfolge zeigt sich ebenso in der Packungsdichte.

### 4.3 Mischleistung und Stabilisationszeit

Während des Mischvorgangs wurde die Mischleistung aller Mischungen aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgt im wesentlichen nach *Mazanec, Lowke und Schießl*, welche in [60] die Stabilisationszeit über die Mischleistung ableiteten. Wobei die Stabilisationszeit jenen Zeitpunkt beschreibt, bei dem eine ausreichende Durchmischung der Frischbetonkomponenten erreicht wurde.

Um die Stabilisationszeit zu Berechnen, ist es notwendig die Messkurve der Mischerleistung durch eine Funktion anzunähern, siehe Abb. 4.13. Dafür wird die Messkurve in zwei Bereiche aufgeteilt. Die Trockenmischdauer wird bei *Mazanec, Lowke und Schießl* für diese Annäherung nicht berücksichtigt. Die Leistung wird normiert, indem die Mischleistung für den Vorgang des Trockenmischens abgezogen wird. Zwischen dem Zeitpunkt der Wasserzugabe und der maximalen Leistung wird die Kurve durch eine gerade angenähert, im Bereich nach dem Hochpunkt durch die Funktion (6).



**Abb. 4.13:** Ermittlung der Stabilisationszeit aus der normalisierten Leistungskurve nach [60]

$$P / P_{max} = P_0 + P_1 e^{\frac{t}{t^1}} + P_2 e^{\frac{t}{t^2}} \quad (6)$$

Mit den Variablen  $P^0$ ,  $P^1$  und  $P^2$  sowie  $t^1$  und  $t^2$  wird die Kurve bestmöglich an die Messwerte angenähert. Die Stabilisationszeit ergibt sich durch die Ableitung der Kurve, wenn der Gradient  $\varepsilon = dP/dt$  einen Wert von  $-4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  erreicht [60].

Im Zuge dieser Arbeit wird von der Vorgehensweise von *Mazanec, Lowke und Schießl* dadurch abgewichen, indem die Leistung beim Trockenmischen mit einbezogen wird. Die Kurve wird daher in drei Bereiche aufgeteilt. Die Leistung beim Trockenmischen wird durch eine horizontale Gerade angenähert. Die Annäherung zwischen dem Zeitpunkt der Wasserzugabe und der maximalen Mischleistung sowie der Bereich nach der maximalen Leistung wird wie bei [60] beschrieben angenähert.

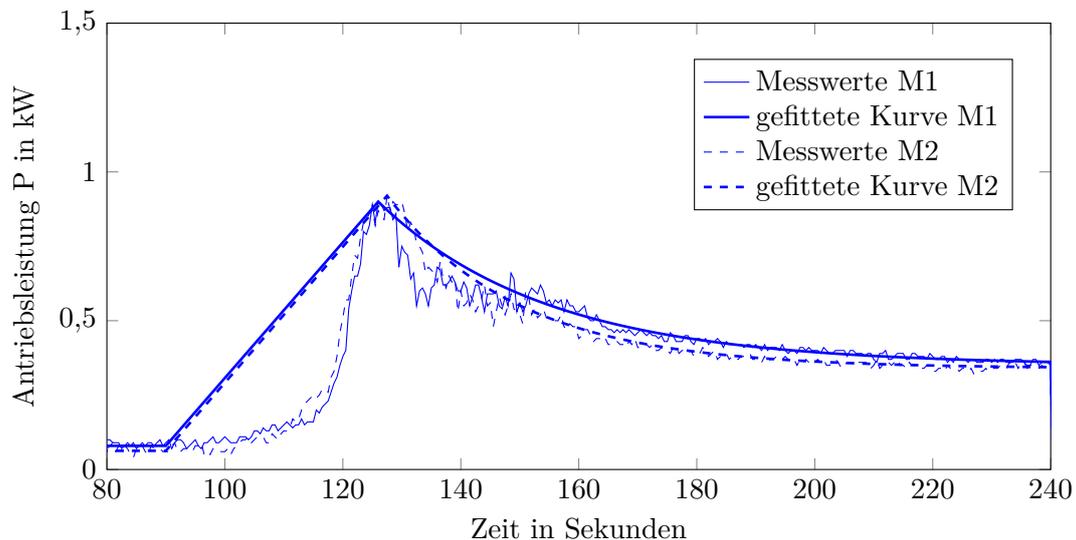
Für den Vergleich zwischen den Mischungen mit verschiedenen Mikrosilika wurde der Mittelwert der jeweiligen Messkurven gebildet. Für diese gemittelte Messkurve wurde eine neuerliche Annäherung vorgenommen. Die Berechnung der Leistung bis zum Erreichen der Stabilisationszeit wurde anhand der Messkurven bestimmt, da die Abweichung der errechneten Geraden ab

Wasserzugabe bis zum Leistungsmaximum teilweise stark von den Messwerten abweicht. Bei Mischungen, welche die Stabilisationszeit nicht erreichten, wurde für die Zeit zwischen Ende der Messung und der Stabilisationszeit die angenäherten Kurve berücksichtigt.

Die Darstellung der Messkurven erfolgt ohne vollständige Darstellung der Trockenmischdauer und beginnt erst bei 80 Sekunden. Da die Leistung des Trockenmischens durch eine horizontale Gerade angenähert wird, kann dieser Abschnitt der Messkurve für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden.

### 4.3.1 Vergleich innerhalb jeder Mischung

#### Mikrosilika "940"



**Abb. 4.14:** Darstellung der normierten Mischleistung bei den Mischungen mit Silika "940"

Die Messkurven der Motorleistung der Mischungen mit dem Mikrosilika "940" werden in Abb. 4.14 dargestellt. Die beiden Kurven weisen nach Beginn der Wasserzugabe nur geringe Unterschiede auf. Nach Erreichen der maximalen Leistung ist zu erkennen, dass die Messkurve M2 nach dem gering ausgeprägtem Plateau niedrigere Werte als die Messkurve M1 aufweist. Die Messkurve M2 wird früher flach, was den Unterschied der Stabilisationszeit von über 27 Sekunden erklärt. Der Anstieg bei und nach der Wasserzugabe ist steil ausgeprägt. Nach Erreichen der maximalen Leistung fallen die Kurven stark ab und bilden bei ca. 0,6 kW für in etwa 15 - 20 Sekunden ein Plateau. Es ist gut zu erkennen, dass die Annäherung der errechneten Geraden nach Wasserzugabe stark von den Messwerten abweicht.

### Mikrosilika "971"

In Abb. 4.15 zeigt, dass die beiden Mischungen ein sehr ähnliches Verhalten und geringe Abweichungen aufweisen. Die Stabilisationszeit unterscheidet sich bei den Proben mit "971" nur um vier Sekunden. Der Anstieg der Motorleistung bei und nach Wasserzugabe ist kontinuierlicher als bei den Mischungen mit "940" und die Kuppe bei der maximalen Leistung ist gerundeter. Der Punkt der maximalen Motorleistung liegt zeitlich später und höher als bei den Mischungen mit "940".

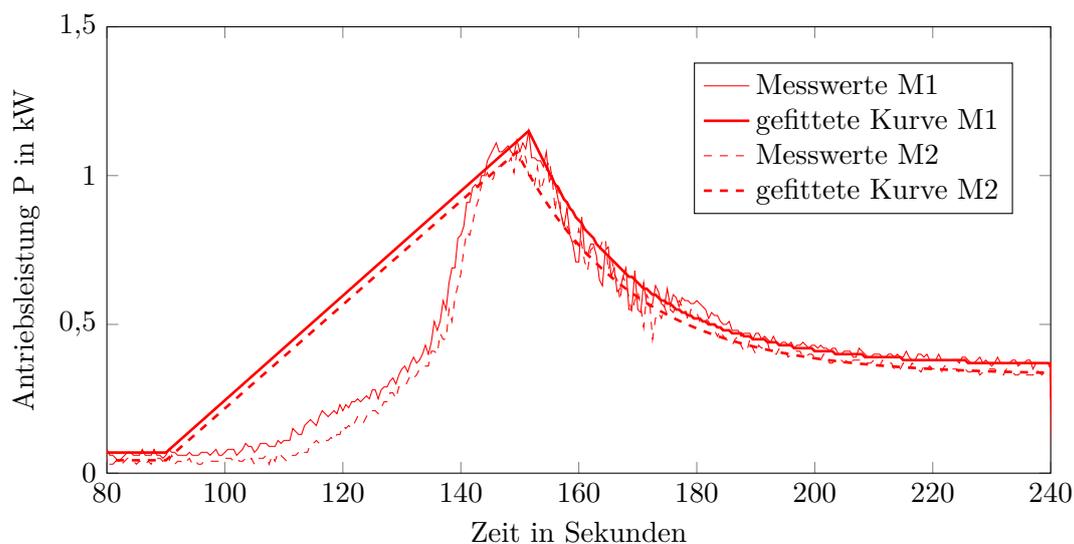


Abb. 4.15: Darstellung der normierten Mischleistung bei den Mischungen mit Silika "971"

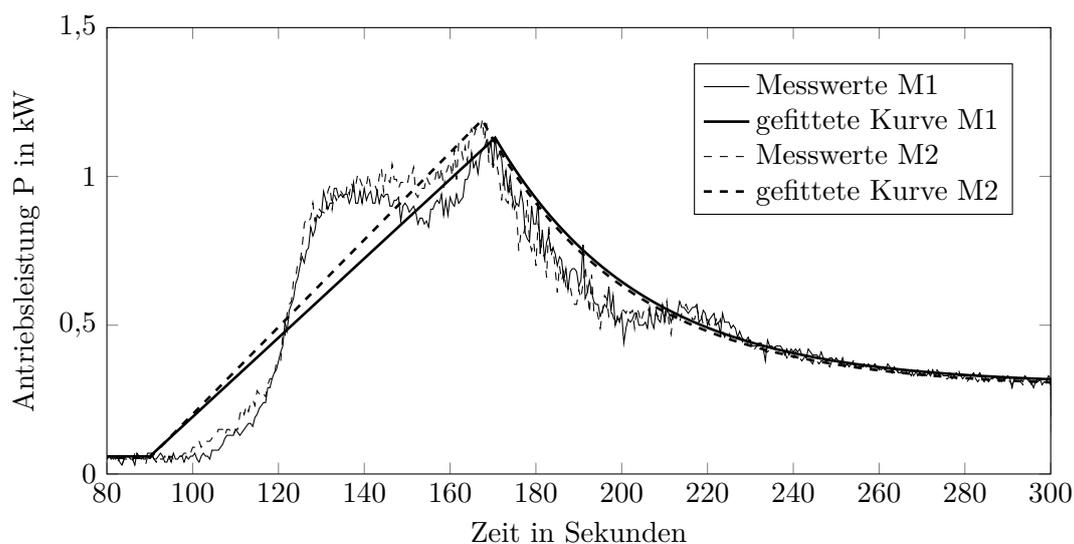


Abb. 4.16: Darstellung der normierten Mischleistung bei den Mischungen mit Silika Microwhite

### Mikrosilika Microwhite

Die Kurven in Abb. 4.16 zeigen nach Beginn Wasserzugabe einen raschen und steilen Anstieg der Leistung. Nach Ende Wasserzugabe, etwa ab Sekunde 120 zeigt sich bei beiden Messungen ein Plateau bevor die Leistung erneut ansteigt. Nach Erreichen des Hochpunktes fallen die Kurven stark ab, wobei die Messkurve M2 geringfügig unter der Kurve M1 liegt. Im Bereich zwischen 190 und 210 Sekunden zeigt sich neuerlich ein Plateau bevor die Leistung weiter abfällt. Die Mischzeit wurde bei den Mischungen mit Microwhite um 60 Sekunden verlängert, da nach 150 Sekunden die notwendige Homogenität der Mischung noch nicht erreicht war. Bei Erreichen der Stabilisationszeit liegt die Leistung der Mischungen mit Microwhite unter denen von "940" und "971".

### Mikrosilika Slurry

Bei der Mischung mit Slurry wird das Wasser gemeinsam mit dem Mikrosilika zu den trocknen Komponenten hinzugefügt. Abb. 4.17 zeigt, dass die Leistung ab Beginn der Wasserzugabe steigt. Bei allen anderen Mischungen ist zu erkennen, dass es nach Beginn der Wasserzugabe eine gewisse "Reaktionszeit" gibt, bevor die Leistung ansteigt. Die beiden Messungen zeigen im Vergleich eine hohe Abweichungen der Messdaten. Die Mischungen erreichen die maximale Leistung im Vergleich mit der Mischung "940" relativ spät.

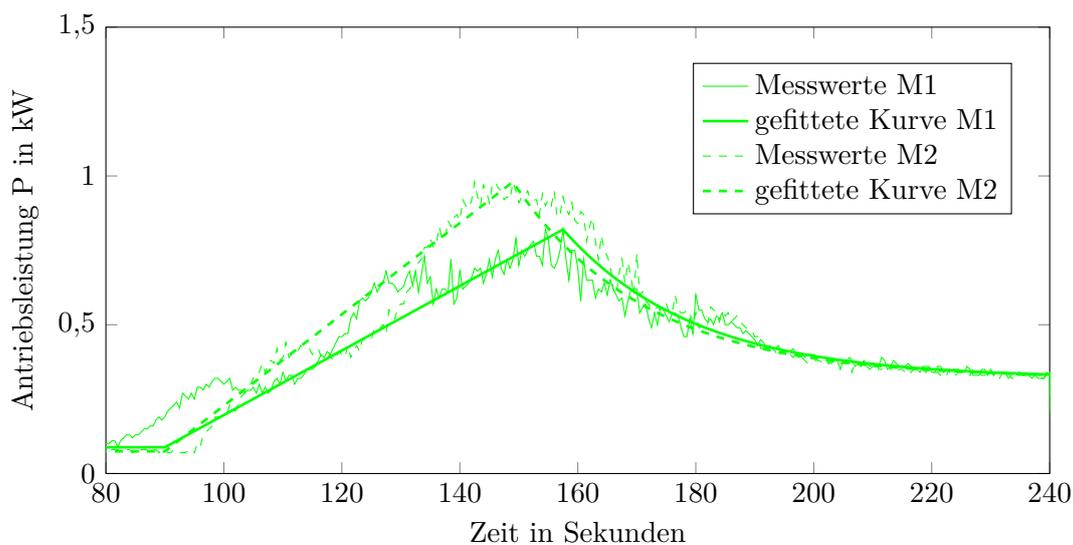
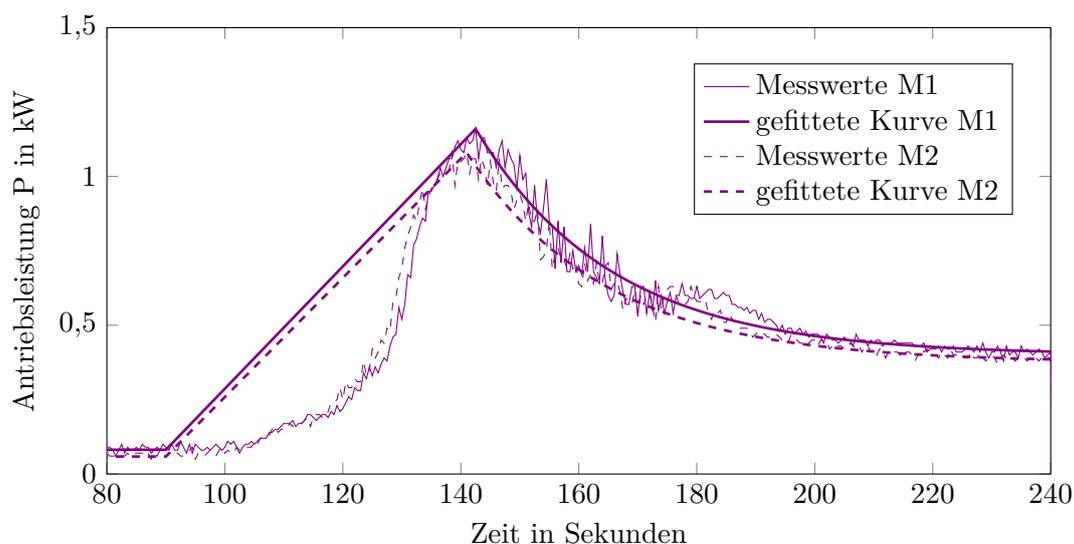


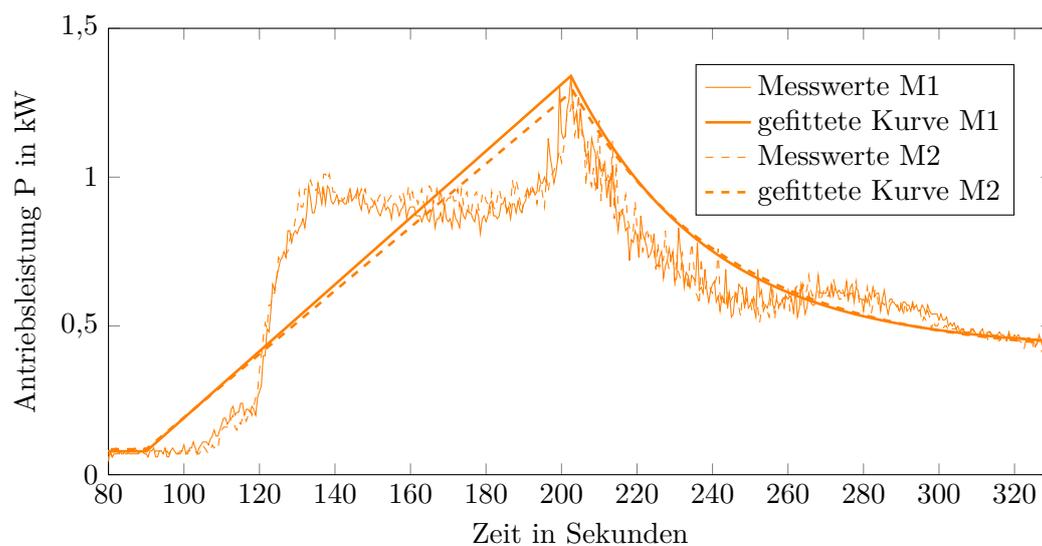
Abb. 4.17: Darstellung der normierten Mischleistung bei den Mischungen mit Silika Slurry

### Mikrosilika Mapei

Die Kurven der Mischungen mit Mapei in Abb. 4.18 zeigen ein Verhalten, welches den Mischungen der Silika "940" und "971" ähnelt. Vor dem Hochpunkt kommt es zu keinem abflachen der Leistung. Die Kurven steigen steiler als jene der Mischungen mit "971" und flacher als bei "940". Der Bereich um den Hochpunkt zeigt eine ähnliche Abrundung wie die Messkurven mit dem Mikrosilika "971". Zwischen 170 und 190 Sekunden zeigt sich ein Plateau bei beiden Messungen, danach fällt die Leistung weiter ab.



**Abb. 4.18:** Darstellung der normierten Mischleistung bei den Mischungen mit Silika Mapei



**Abb. 4.19:** Darstellung der normierten Mischleistung bei den Mischungen mit Silika Sika

### Mikrosilika Sika

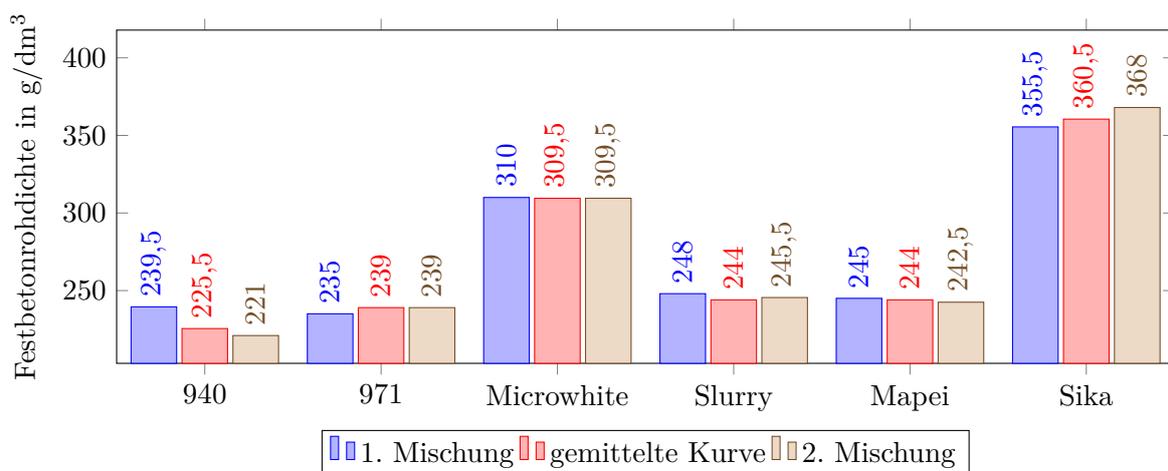
Abb. 4.19 zeigt wie Abb. 4.16 einen starken Anstieg nach Beginn der Wasserzugabe. Das Plateau, welches bei etwa 130 Sekunden beginnt, ist jedoch bei den Versuchen mit Sika stärker ausgeprägt als bei Microwhite. Es ist zusätzlich zu beachten, dass die Mischzeit bei Sika von 240 auf 330 Sekunden verlängert wurde, da die Durchmischung des Frischbetons nach 240 Sekunden noch nicht gegeben war. Beim Abfall der Leistung zeigt sich ab ca. 240 Sekunden ein langes Plateau, bevor die Leistung weiter abfällt.

### 4.3.2 Vergleich und Interpretation

Im Vergleich der einzelnen Kurven ist zu erkennen, dass es zwei Typen von Messkurven gibt. Bei "940", "971" und Mapei steigt die Leistung nach einer kurzen Reaktionszeit stetig bis zum Hochpunkt an. Die Messungen mit Microwhite, Slurry und Sika zeigen vor Erreichen des Hochpunktes ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Plateau. Alle Mischungen zeigen eine Abflachung des Leistungsabfalles nach dem Hochpunkt, bevor die Leistung sich weiter einer Horizontalen annähert.

**Tab. 4.3:** Mischdauer der verschiedenen Mikrosilika in Sekunden

	940	971	Microwhite	Slurry	Mapei	Sika
Mischdauer	240	240	300	240	240	330

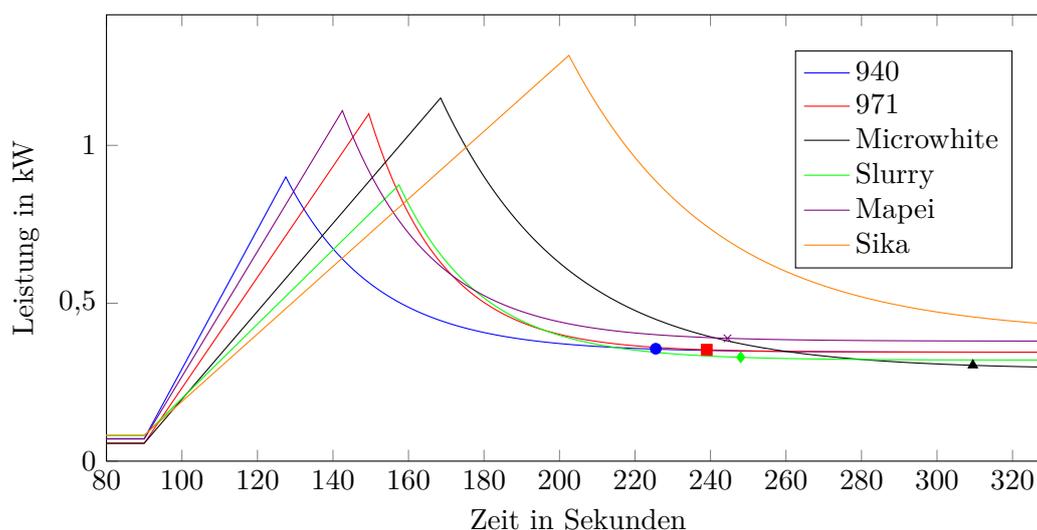


**Abb. 4.20:** Stabilisationszeit der verschiedenen Mikrosilika in Sekunden

Tab. 4.3 zeigt die verschiedenen Mischdauern der jeweiligen Silika und Abb. 4.20 jeweils die

entsprechenden Stabilisationszeiten der Mischungen und der gemittelten Kurven. Die Stabilisationszeit wurde nur von den Mischungen "940" und "971" erreicht. Bei den anderen Mischungen wurde diese anhand der jeweiligen Funktion extrapoliert. Es ist zu erkennen, dass die Mischungen mit Microwhite und Sika länger gemischt wurden. Bei Microwhite wurde die Mischzeit um eine und bei Sika um eineinhalb Minuten verlängert, da bei beiden Mischungen nach vier Minuten die gewünschte Durchmischung nicht erreicht war. Für das Erreichen der Stabilisationszeit wäre bei den Mischungen Microwhite, Slurry und Mapei jeweils eine zwischen fünf und zehn Sekunden längere Mischdauer notwendig gewesen. Die Mischungen mit Sika, zeigen, dass eine Verlängerung der Mischdauer um etwa eine halbe Minute zum Erreichen der Stabilisationszeit notwendig gewesen wäre. Die Mischdauer und die Stabilisationszeit stimmen bei den Mischungen mit "940" und "971" gut überein. Trotz der Ähnlichkeit der Partikelgrößenverteilung der Mikrosilika "940" und Slurry ergibt sich für die Mischungen mit Slurry eine längere Stabilisationszeit. Diese Differenz kann möglicherweise auf das den Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Mischleistung zurückgeführt werden. Im Vergleich ist zu erkennen, dass die Mischungen mit Slurry die maximale Mischleistung im Mittel um 30 Sekunden später erreicht als "940". Diese Differenz kann wahrscheinlich auf den Umstand zurückgeführt werden, dass das Mikrosilika bei der Mischung mit dem Slurry nicht bereits beim Trockenmischen mit den anderen Feststoffkomponenten vermengt wurde.

Für einen besseren Vergleich der Mischleistung der verschiedenen Silika werden die gefitteten Kurven der gemittelten Kurven herangezogen.

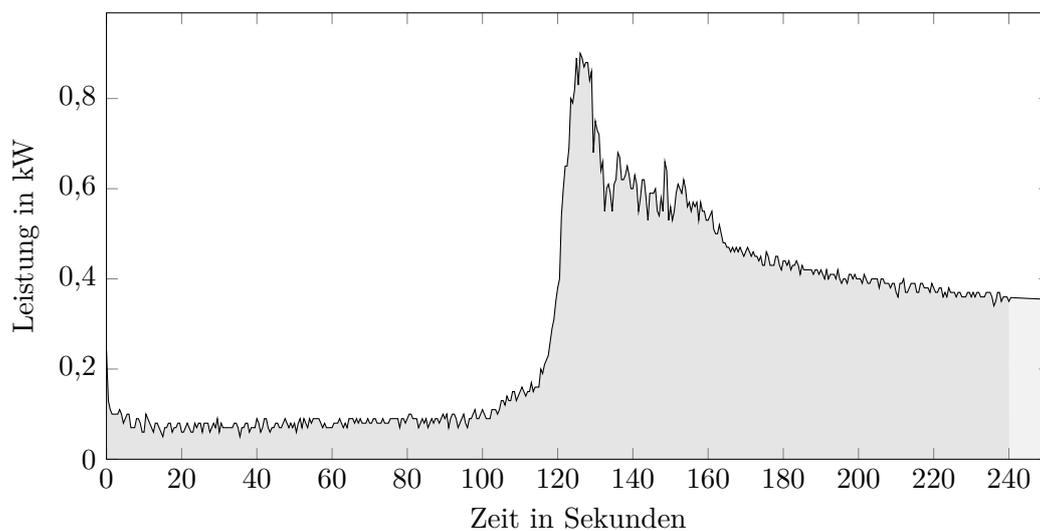


**Abb. 4.21:** Vergleich der gefitteten Kurven der Mischleistung und Darstellung der Stabilisationszeit

Um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde für die Zeitachse in Abb. 4.21 die

längste Mischdauer gewählt. Die Kurven mit kürzeren Mischdauern wurden extrapoliert. Die jeweilige Stabilisationszeit der einzelnen Mischungen wurde in den jeweiligen Kurven eingetragen. Die Stabilisationszeit wurde nach einer Mischdauer von 330 Sekunden bei der Mischung mit Sika noch nicht erreicht und ist daher nicht eingetragen.

Für die Berechnung der Gesamtleistung der einzelnen Mischungen wurde für jede Rezeptur die Leistung der beiden Messkurven und des Mittelwerts dieser bis zur Stabilisationszeit berechnet. Die Berechnung erfolgt, wie in Abb. 4.22 beispielhaft dargestellt, mit den genauen Messwerten und nicht mit den gefitteten Kurven.



**Abb. 4.22:** Darstellung der notwendigen Mischleistung bis zur Stabilisationszeit

Bei Messungen, bei denen die Stabilisationszeit nicht erreicht wurde, wurde der fehlende Bereich mit den gefitteten Kurven extrapoliert, dieser wird in der Abbildung mit Hellgrau dargestellt. Da in diesem Bereich die Leistungsschwankungen sehr gering sind und die Aussage qualitativ getroffen wird, ist der Fehler zu vernachlässigen.

Für die Berechnung der gesamten Mischleistung wird die Fläche unter der Leistungskurve integriert. Tab. 4.4 zeigt die jeweilige Mischarbeit für alle Mischungen. Jede Mischung weist eine Masse von 7,49 kg auf. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wird die benötigte Leistung für 100 kg Mischgut hochgerechnet.

Die Berechnung der Mischleistung zeigt, dass für die selbe Menge Frischbeton, bei der Verwendung von verschiedenen Mikrosilika sich die notwendig einzubringende Mischleistung mehr als verdoppeln kann. Die Mischungen mit "940" und "971" zeigen die geringsten notwendigen Mischleistungen. Die Mischungen mit Sika zeigen mit Abstand die größte notwendige Leistung,

**Tab. 4.4:** Vergleich der Mischleistung in kWh

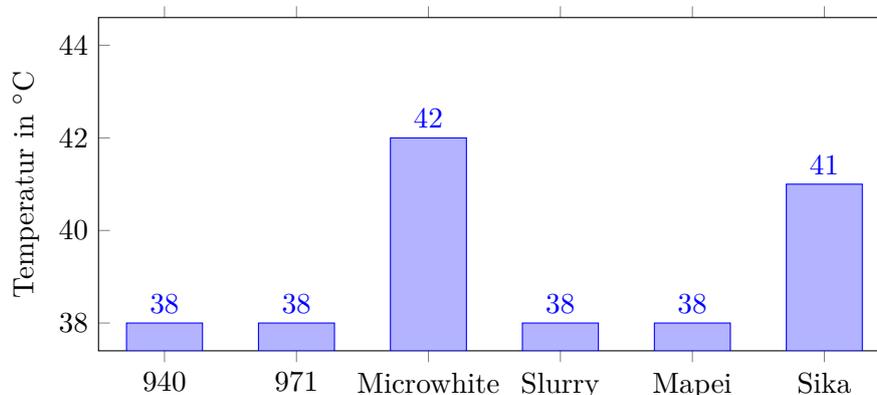
	940	971	Microwhite	Slurry	Mapei	Sika
Mischarbeit M1	66,26	72,90	119,45	81,18	85,62	176,39
Mischarbeit M2	58,80	65,97	121,07	83,48	79,65	183,77
Gemittelt	61,49	70,00	120,13	82,74	82,69	179,26
Mischarbeit / 100 kg	820,93	934,55	1603,90	1104,72	1103,94	2393,26

was bereits gut in Abb. 4.21 zu erkennen war. Mischungen mit Slurry und Mapei weisen beinahe die selbe Mischleistung auf und liegen im Vergleich im unteren Leistungsbereich. Microwhite liegt im Mittelfeld. Es ist nur teilweise ein Zusammenhang der Berechnungen mit den Partikelgrößenverteilungen aus Kapitel 4.1 zu erkennen. Durch das Verhalten der Silica "940" und "971" bei Energieeintrag und die Partikelgrößenverteilung kann die geringe notwendige Leistung für die Mischungen erklärt werden. Jedoch weist das Mikrosilika Slurry eine ähnliche Partikelgrößenverteilung auf. Der Unterschied ist wie bereits beschrieben möglicherweise auf die geänderte Mischreihenfolge zurückzuführen. Die Mischungen mit Sika benötigen mehr als doppelt so viel Leistung als jene mit Mapei. Dieser Zusammenhang kann mit Betrachtung der Partikelgrößenverteilung nicht in Zusammenhang gestellt werden.

#### 4.4 Frischbetoneigenschaften

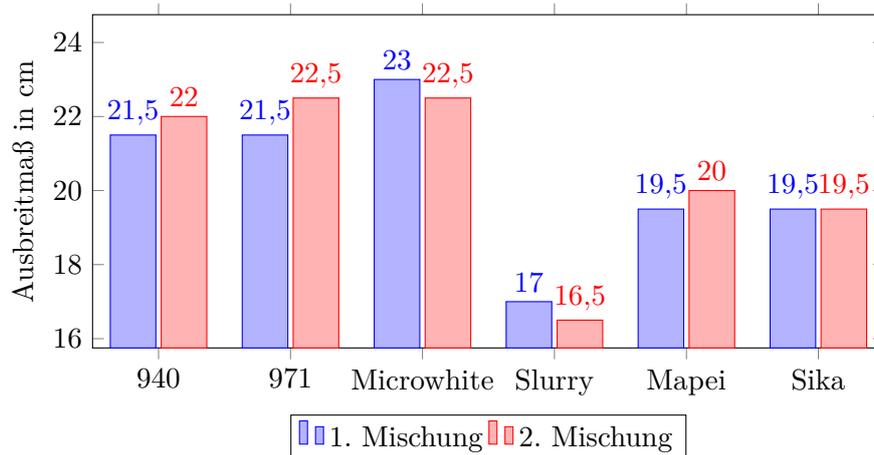
Nach Fertigstellung jeder Mischung wurde am Frischbeton jeweils die Temperatur, die Trichter-auslaufzeit, das Ausbreitmaß, die Rohdichte und der Luftgehalt bestimmt.

##### 4.4.1 Frischbetontemperatur

**Abb. 4.23:** Frischbetontemperatur bei der Verwendung verschiedener Microsilika

Die Frischbetontemperatur betrug bei einer Mischzeit von 240 Sekunden nach Fertigstellung der Mischung jeweils 38 °C. Bei den Mischungen mit Microwhite und Sika war die Durchmischung des Frischbetons noch nicht erreicht und die Mischzeit wurde verlängert. Bei den Mischungen mit Microwhite wurde die Mischdauer um eine Minute, bei Sika um eineinhalb Minuten verlängert. Bei den Mischungen mit diesen beiden Mikrosilika ist zu erkennen, dass die Temperatur gegenüber den anderen Mischungen erhöht ist. Dies lässt sich auf die längere Mischdauer zurückführen. Als wesentliche Gründe für die Notwendigkeit einer längeren Mischdauer können einerseits eine langsame Reaktion des Zementleims und des Mikrosilikas mit dem Fließmittel, welche sich durch eine geringfügig andere chemische Zusammensetzung durch die verschiedenen Mikrosilika ergibt, oder andererseits eine andere Struktur des Mikrosilika sein, welcher einen größeren Energieeintrag benötigt, um die Bindungen der Agglomerate innerhalb des Silicas aufzubrechen.

#### 4.4.2 Ausbreitmaß

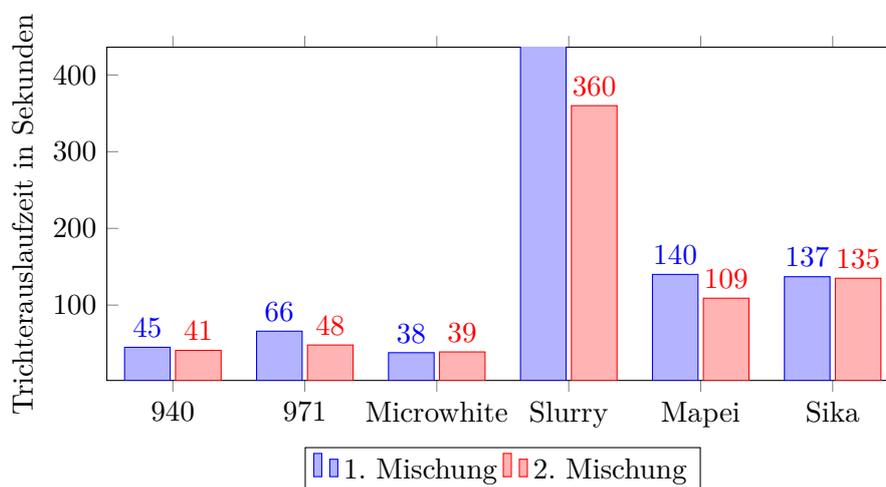


**Abb. 4.24:** Ausbreitmaß bei der Verwendung verschiedener Microsilika

Abb. 4.24 zeigt das Ausbreitmaß der jeweiligen Mischungen. Es ist gut zu erkennen, dass die Mischungen mit Slurry, das geringste Ausbreitmaß zeigen. Die Mischungen mit den Silika "940", "971" und Microwhite zeigen ein ähnlich hohes Ausbreitmaß. Die Mischungen mit Mapei und Sika liegen mit 19,5 cm und 20 cm im Mittelfeld der betrachteten Mischungen. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Ausbreitmaß und der Mischleistung bzw. der Stabilisationszeit ist nicht zu erkennen. Bei den Mischungen lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Partikelgrößenverteilung und dem Ausbreitmaß herstellen. "940", "971" und Microwhite zeigen einen großen Feinstkornanteil ( $10^{-1} - 10^0 \mu\text{m}$ ) und ein großes Ausbreitmaß. Mapei und Sika weisen ein geringeres Ausbreitmaß bei kleinerem Feinstkornanteil auf. Ein Zusammenhang zwischen dem Ausbreitmaß und der Korngrößenverteilung bei den Mischungen mit Slurry lässt sich nicht herstellen.

#### 4.4.3 Trichterauslaufzeit

Die Trichterauslaufzeit dient auch (wie das Ausbreitmaß) zur Messung der Viskosität des Frischbetons. Abb. 4.25 zeigt die jeweiligen Auslaufzeiten der Mischungen. Aufgrund dieser Daten kann auf eine Verbindung der Trichterauslaufzeit mit dem Ausbreitmaß geschlossen werden.

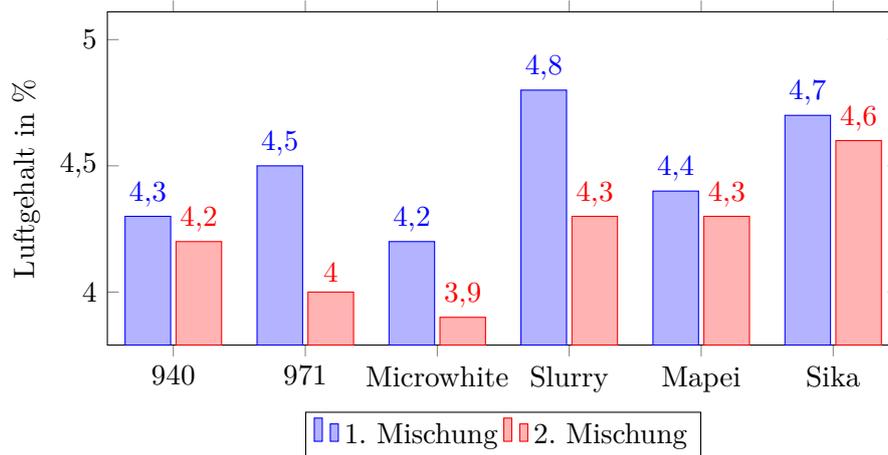


**Abb. 4.25:** Trichterauslaufzeiten bei der Verwendung verschiedener Mikrosilika

Die Mischungen mit den Silika "940", Microwhite und Sika zeigen die geringste Abweichung der Trichterauslaufzeit. Die Silika "971" und Mapei zeigen eine größere Differenz innerhalb der jeweiligen Mischungen. Bei der ersten Mischung mit Slurry konnte keine Trichterauslaufzeit festgestellt werden, da der Frischbeton keine ausreichende Viskosität aufweist, dies korreliert mit den Messwerten des Ausbreitmaßes. Beide Frischbetoneigenschaften zeigen die geringe Viskosität der Mischung mit dem Slurry. Die Mischungen mit Microwhite zeigen die kürzesten Auslaufzeiten, gefolgt von "940" und "971", dies entspricht den Ergebnissen der großen Ausbreitmaße dieser Mischungen. Mapei und Microwhite weisen im Mittel mehr als die dreifache Auslaufzeit der Mischungen mit Microwhite auf. Mischungen mit einem großen Feinstkornanteil zeigen eine geringe Trichterauslaufzeit und somit eine hohe Viskosität. Mit geringen Feinstkornanteilen zeigen die Mischungen Mapei und Sika eine längere Trichterauslaufzeit und eine geringere Viskosität als die Vergleichsmischungen. Ein Zusammenhang der Korngrößenverteilung und der Trichterauslaufzeit ist bei den Mischungen mit Slurry nicht zu erkennen.

#### 4.4.4 Frischbetonluftgehalt

Der Frischbetonluftgehalt wird in Abb. 4.26 dargestellt. Alle Mischungen weisen einen Luftgehalt zwischen 3,9 % und 4,8 % auf. Die Mischungen "940", Mapei und Sika zeigen die geringsten Abweichungen des Frischbetonluftgehaltes. Im Mittel zeigt der Frischbeton mit Microwhite

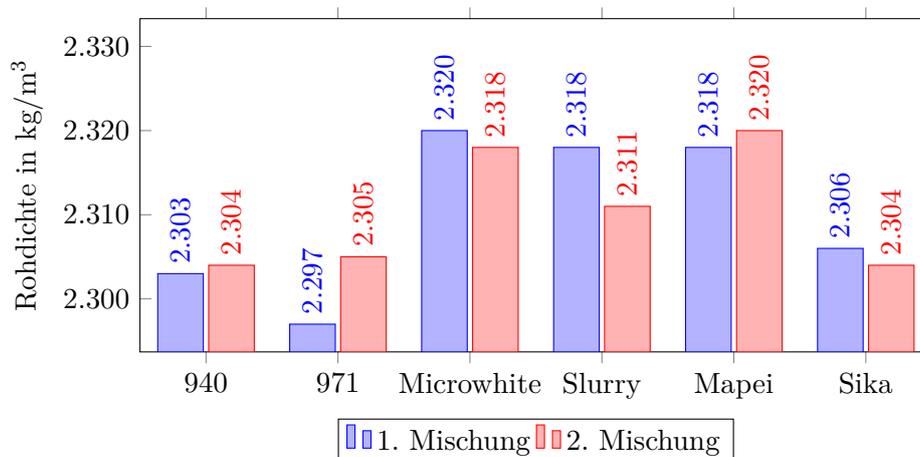


**Abb. 4.26:** Frischbetonluftgehalt bei der Verwendung verschiedener Mikrosilika

den geringsten Frischbetonluftgehalt. Die geringsten Abweichungen beim Frischbetonluftgehalt ergeben sich bei Frischbeton mit "940", Mapei und Sika. Die Betone mit "971" und Slurry zeigen mit 0,5 % Unterschied zwischen der ersten und zweiten Mischung die größte Abweichung. Beim Luftgehalt lässt sich kein direkter Zusammenhang mit der Mischleistung und der Mischdauer feststellen. Mischungen mit einem hohen Feinstkornanteil weisen eher einen geringen Luftgehalt auf. Dieser Zusammenhang lässt sich wie jene beim Ausbreitmaß und der Trichterauslaufzeit nicht auf die Mischungen mit Slurry übertragen.

#### 4.4.5 Frischbetonrohichte

Die Frischbetonrohichte aller Mischungen liegt zwischen  $2.297 \text{ kg/m}^3$  und  $2.320 \text{ kg/m}^3$  und zeigt somit eine geringe Streuung, siehe Abb. 4.27.



**Abb. 4.27:** Frischbetonrohichte bei der Verwendung verschiedener Mikrosilika

Die Mischungen mit den Silika Microwhite und Mapei weisen die größte Frischbetondichte auf. Die Rohdichte der Mischungen mit dem Slurry liegt geringfügig darunter. Bei den beiden Mischungen mit Slurry zeigt sich eine, im Vergleich zu den anderen Silika, große Abweichung der beiden Mischungen. Die Mischungen mit "971" weisen ebenfalls eine relativ große Abweichung auf. Es zeigt sich kein direkter Zusammenhang der Frischbetonrohndichte mit der Mischleistung, der Mischdauer, der Packungsdichte und der Partikelgrößenverteilung.

#### 4.4.6 Vergleich und Interpretation

In Tab. 4.5 ist die jeweilige Abweichung vom Mittelwert der beiden Messungen angeführt. Die Abweichung der Trichterauslaufzeit der Mischungen mit dem Slurry konnte nicht ermittelt werden, da bei der ersten Mischung der Trichter verstopfte und keine Trichterauslaufzeit ermittelt werden konnte.

**Tab. 4.5:** Zusammenfassung der Abweichungen bei verschiedenen Silikas

	Trichterauslaufzeit	Ausbreitmaß	Rohdichte	Luftgehalt
940	MW $\pm$ 4,65 %	MW $\pm$ 1,15 %	MW $\pm$ 0,02 %	MW $\pm$ 1,18 %
971	MW $\pm$ 15,79 %	MW $\pm$ 2,27 %	MW $\pm$ 0,17 %	MW $\pm$ 5,88 %
Microwhite	MW $\pm$ 1,30 %	MW $\pm$ 1,10 %	MW $\pm$ 0,04 %	MW $\pm$ 3,70 %
Slurry	-	MW $\pm$ 1,49 %	MW $\pm$ 0,15 %	MW $\pm$ 5,49 %
Mapei	MW $\pm$ 12,45 %	MW $\pm$ 1,27 %	MW $\pm$ 0,04 %	MW $\pm$ 1,15 %
Sika	MW $\pm$ 0,74 %	MW $\pm$ 0,00 %	MW $\pm$ 0,04 %	MW $\pm$ 1,08 %

Es ist zu erkennen, dass die Trichterauslaufzeiten bei der Verwendung von Microwhite und Sika die geringsten Streuungen aufweisen. "971" und Mapei zeigen hingegen die größten Abweichungen. Beim Ausbreitmaß ist zu erkennen, dass Sika keine Abweichung aufweist. "971" zeigt mit  $\pm$  2,27 % die größte Abweichung bei den beiden Messungen. Die Rohdichte zeigt bei allen Mischungen nur eine geringe Abweichung. Beim Luftgehalt zeigen sowohl die Messungen mit "940" als auch jene mit Mapei und Sika die geringsten Abweichungen. "971" weist bei allen Messungen die größten Streuungen auf. Mit Ausnahme der Streuung bei der Rohdichte weisen die Mischungen mit Sika die geringsten Streuungen auf.

## 4.5 Rheologische Eigenschaften

Für die rheologischen Untersuchungen wurde das Gerät Viskomat NT der Firma Schleibinger verwendet. Die relevanten technischen Daten sind in Tab. 4.6 zusammengefasst.

**Tab. 4.6:** Technische Daten Viskomat NT [61]

Leistung	300	W
Drehmoment	-500-+500	Nmm
Drehzahl	0,001-400	U/min
Prüfgutmenge	370	ml
Winkelauflösung	1*10E-4	Grad
Winkelgenauigkeit über 1 Umdrehung	2*10E-2	Grad

Das Verhalten von UHPC lässt sich mit jenem eines Bingham'schen Körper vergleichen. Beim Einwirken einer Kraft verhält es sich wie ein Festkörper, jedoch nur, solange die Kraft einen materialabhängigen Schwellenwert nicht überschreitet. Bei der Einwirkung einer Kraft, die größer als der Schwellenwert ist, verhält sich das Medium wie eine Flüssigkeit. Da die rheologischen Vorgänge von Flüssigkeiten mit einem laminaren, stationären Schervorgang untersucht werden können, kann für die nachfolgenden Untersuchungen der Viskomat NT der Firma Schleibinger eingesetzt werden. Für die Beschreibung des Verformungsverhalten von Flüssigkeiten, wird vom Plattenmodell ausgegangen, welches in Kapitel 2.1.6 auf Seite 21 beschrieben wird. Ein Nachteil dieses Plattenmodells ist, dass die Entmischung der Suspension während der Messung nicht beschrieben werden kann. Das gilt für Suspensionen wie Mörtel und Zementleim. Um die Entmischung zu vermeiden, wurde für die Messung der rheologischen Eigenschaften der Viskomat NT mit Messpaddel herangezogen, siehe Abb. 4.28 (a). Durch diesen speziellen Rührer, der die Suspension permanent mischt, kommt es zu keiner Entmischung. Als Messergebnis wird das Drehmoment in Abhängigkeit der Umdrehungsgeschwindigkeit gemessen. Das Schergefälle der Probe lässt sich bei diesem Messpaddel nicht genau bestimmen, da kein definierter Spalt vorhanden ist. Es wird ein relatives Maß für das Fließverhalten ausgegeben. Es handelt sich daher um eine vergleichende Untersuchung [23]. Folgende Korrelationen können herangezogen werden:

Durch die Korrelationen aus Tab. 4.7 mit Formel (5) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$T \approx h \cdot N + g \quad (7)$$

**Tab. 4.7:** Korrelation bei verschiedenen Messgeometrien [23]

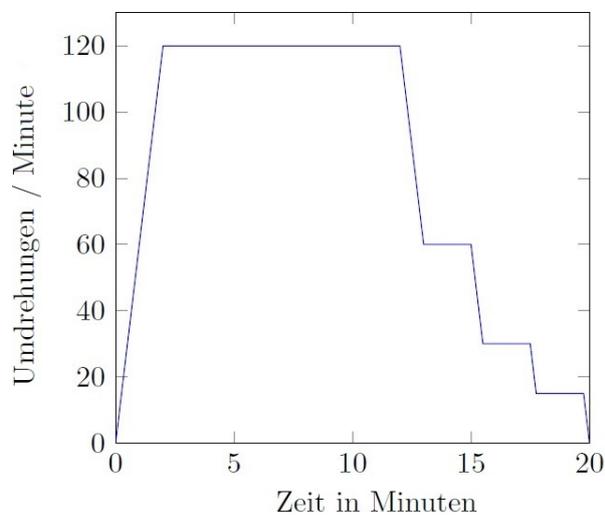
Drehmoment	$T$ [Nmm]	$\approx$	$\tau$
Geschwindigkeit	$N$ [min <sup>-1</sup> ]	$\approx$	$\dot{\gamma}$
Steigung der Fließkurve	$h$ [Nmm · min]	$\approx$	$\eta$
Achsabschnitt der Fließkurve	$g$ [Nmm]	$\approx$	$\tau_0$

Die Messung der rheologischen Eigenschaften erfolgt im Viskomat nach einer vorgegebenen Rampe, siehe Abb. 4.28 (b). Mit einer Steigerung von 1 U/Sekunde wird die Drehzahl von 0 auf 120 U/Minute erhöht. Diese Geschwindigkeit wird zehn Minuten lang aufrecht erhalten. Danach erfolgt eine stufenweise Reduktion der Drehzahl jeweils um die Hälfte. Die Haltezeiten der Plateaus beträgt jeweils zwei Minuten.

Die Ermittlung des dynamischen Fließmoments  $g$  und die Steigung der Fließkurve  $h$  erfolgt aus dem Drehmomenten-Zeit Diagramm. Abb. 4.29 zeigt eine repräsentativen Drehmomentenverlauf einer UHPC Probe, welche nach dem in Abb. 4.28 (b) gezeigten Verlauf gemessen wurde.



(a) Viskomat

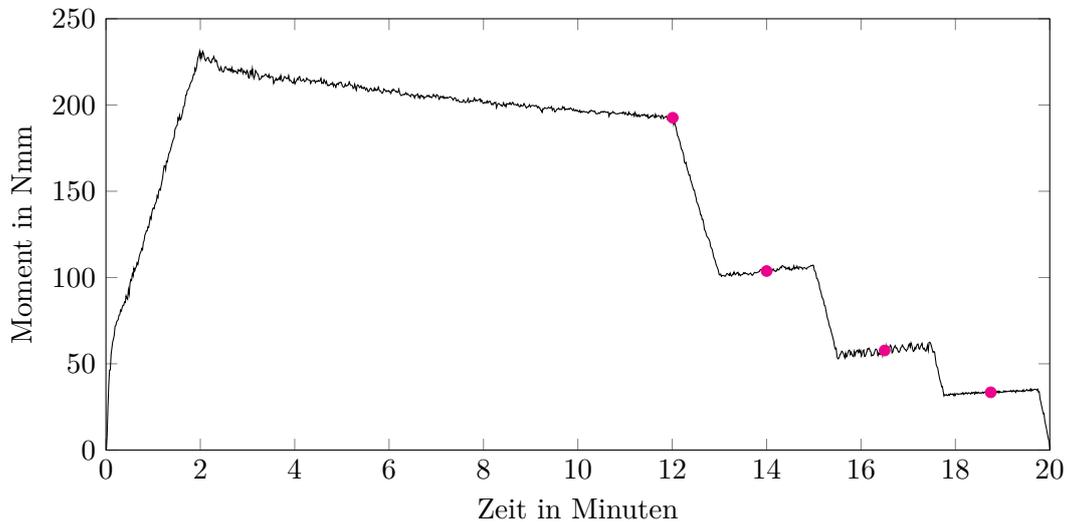


(b) Rampe

**Abb. 4.28:** Viskomat NT von Schleibinger [61] und die verwendete Rampe zur Bestimmung der Fließkurve

Für die Auswertung der Messdaten im betrachteten Bereich von 0,25 bis 2 s<sup>-1</sup> wurde das Bingham-Modell herangezogen. Alle Proben zeigen in diesem Bereich einen linearen Zusammenhang der Scherrate zum Drehmoment. Für die Messpunkte wurde für das zehn Minuten-Plateau

der letzte Wert des Plateaus herangezogen. Für die zwei Minuten-Plateaus wurde jeweils der Mittelwert berechnet, siehe Abb 4.29. Die Messungen erfolgten bei allen Proben wenige Minuten nach Beendigung des Mischvorgangs.



**Abb. 4.29:** Exemplarische Darstellung des aufgezeichneten Drehmoments

Die Auswertung des dynamischen Fließmoments und der Steigung der Fließkurve erfolgte für beide Mischungen jeder Rezeptur getrennt von einander, um die Differenz der Mischungen innerhalb einer Rezeptur festzustellen.

### Mikrosilika "940" und "971"

Bei den Mischungen mit dem Mikrosilika "940" ist zu erkennen, dass die Steigung der Fließkurve der 1. Mischung größer ist als jene der 2. Mischung, siehe Abb. 4.30. Die Abweichung ist jedoch zu vernachlässigen, da die Differenz der beiden Kurve bei zwei Umdrehungen pro Sekunde bei 7,6 Nmm liegt und diese somit 2,17 % beträgt. Das dynamische Fließmoment liegt bei der Annahme eines Bingham'schen Körpers bei 11,74 Nmm bzw. bei 10,97 Nmm.

Verglichen mit den Mischungen des Mikrosilikas "940" weisen die Mischungen mit "971" in Abb. 4.30 eine größere Abweichung der Steigung der Fließgeraden auf. Diese beträgt bei zwei Umdrehungen pro Sekunde 2,97 %. Die Viskosität der Geraden mit "971" liegt höher als jene mit "940". Das weist darauf hin, dass die Mischungen mit "940" bei höheren Geschwindigkeiten fließfähiger sind. Das dynamische Fließmoment streut bei den Messungen mit "971" mehr als bei den Messungen mit "940", liegt jedoch im selben Wertebereich.

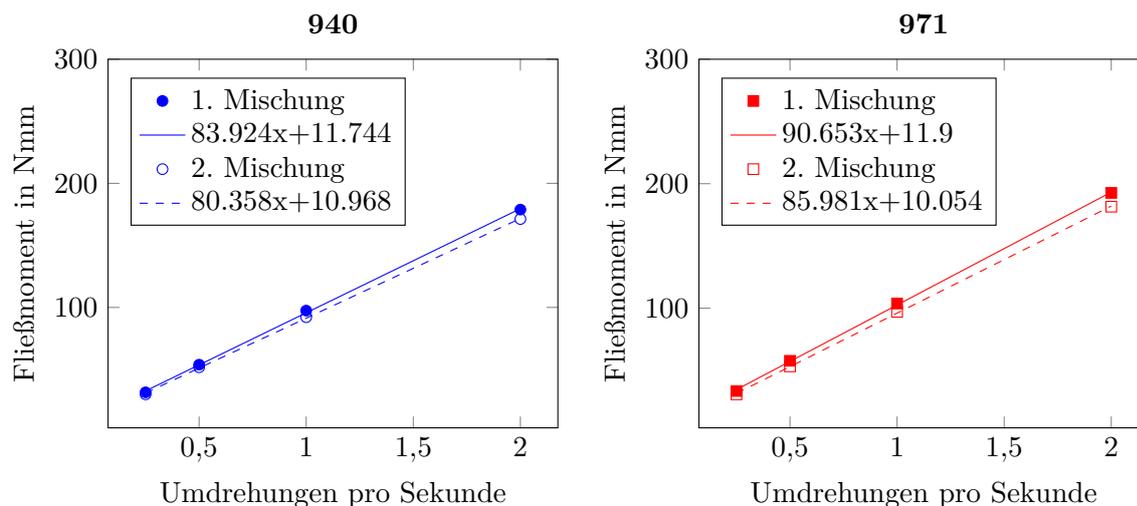


Abb. 4.30: Fließmoment in Abhängigkeit der Drehzahl

### Mikrosilika Microwhite und Slurry

Abb. 4.31 zeigt, dass beide Messungen mit dem Mikrosilika Microwhite fast dieselbe Steigung aufweisen. Mit freiem Auge ist bei den angenäherten Geraden kaum eine Abweichung erkennbar. Das dynamische Fließmoment liegt gering unter den Werten von "940" und "971".

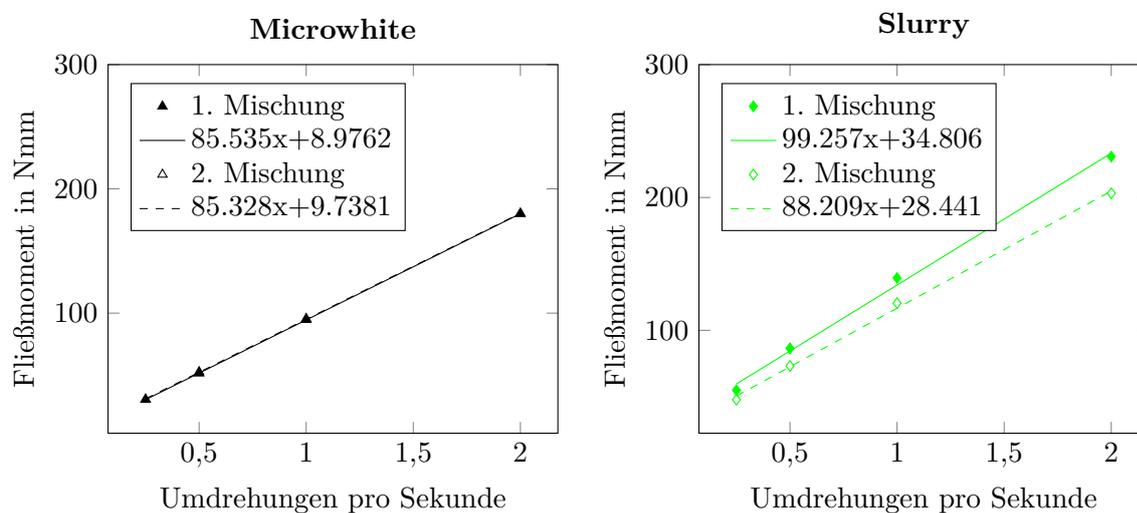


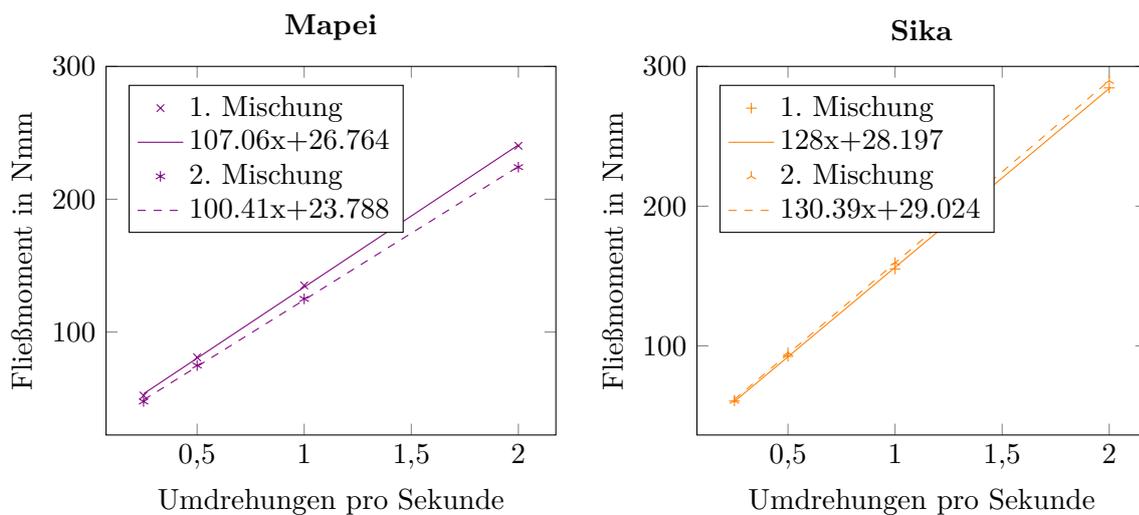
Abb. 4.31: Fließmoment in Abhängigkeit der Drehzahl

Die gefitteten Geraden bei den Messungen mit Slurry in Abb. 4.31 zeigen weit höhere Werte für das dynamische Fließmoment. Zudem weist die Steigung der Fließkurve eine höhere Streuung auf, als die bisher betrachteten Mikrosilika. Diese Abweichung beträgt bei zwei Umdrehungen pro Sekunde 6,37 %.

### Mikrosilika Mapei und Sika

Die Mischungen mit Mapei zeigen sowohl eine hohe dynamische Fließgrenze als auch eine höhere Steigung, siehe Abb. 4.32. Das dynamische Fließmoment liegt bei 26,8 Nmm bzw. bei 23,8 Nmm.

Die beiden gefitteten Geraden mit Sika in Abb. 4.32 zeigen sowohl bei der dynamischen Fließgrenze als auch bei der Steigung der Fließkurve nur geringe Abweichungen. Die Viskosität bei den Mischungen mit Sika ist höher als bei den anderen Mischungen.

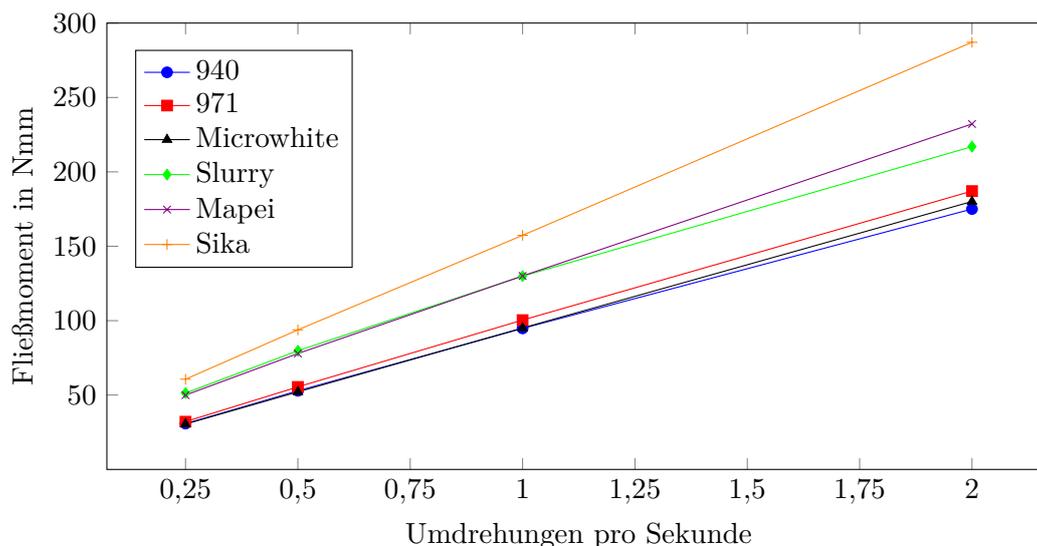


**Abb. 4.32:** Fließmoment in Abhängigkeit der Drehzahl

### Überblick Fließmomente

Für den direkten Vergleich der einzelnen dynamischen Fließmomente und Viskositäten der verschiedenen Mikrosilika werden die Mittelwerte der jeweiligen Mischungen verglichen, siehe Abb. 4.33.

Im Zusammenhang der Abb. 4.33 mit der Tab. 4.8 ist gut zu erkennen, dass Microwhite die geringste dynamische Fließgrenze der betrachteten Mischungen aufweist. Die dynamischen Fließgrenzen der Mischungen mit "971" und "940" liegen mit 10,98 Nmm und 11,36 Nmm nur knapp darüber. Die Mischung mit Slurry weist mit 31,62 Nmm die größte dynamische Fließgrenze der betrachteten Mischungen auf. Sika und Mapei liegen etwas darunter. Es ist gut zu erkennen, dass die Mischungen mit den geringeren dynamischen Fließmomenten auch geringere Steigungen der Fließkurve aufweisen als die Mischungen mit den höheren dynamischen Fließgrenzen. Hier ergibt sich die kleinste Steigung der Kurve mit dem Mikrosilika "940" bei 82,14 Nmm·min und



**Abb. 4.33:** Vergleich der Fließmomente der einzelnen Rezepturen

die größte bei Sika mit 129,19 Nmm·min.

**Tab. 4.8:** Zusammenfassung der dynamischen Fließgrenzen und der Steigung der Fließgeraden

	940	971	Microwhite	Slurry	Mapei	Sika
dyn. Fließmoment in Nmm	11,36	10,98	9,36	31,62	25,28	28,61
Steigung der Fließgeraden in Nmm·min	82,14	88,32	85,43	93,73	103,74	129,19

Bei der Betrachtung der Rheologie der einzelnen Rezepturen im Zusammenhang mit den Frischbetoneigenschaften aus Kapitel 4.4 lassen sich Verbindungen mit dem Ausbreitmaß und der Trichterauslaufzeit herstellen. Die Mischung mit Microwhite weist das größte Ausbreitmaß, die kürzeste Trichterauslaufzeit und das geringste dynamische Fließmoment auf. Die Mischungen mit "940" und "971" weisen jeweils ein hohes Ausbreitmaß, eine kurze Trichterauslaufzeit und eine geringe dynamische Fließgrenze auf. Slurry, Mapei und Sika zeigen hohe dynamische Fließmomente, ein kleines Ausbreitmaß und eine hohe Trichterauslaufzeit. Die Mischungen "940", "971" und Microwhite weisen die geringsten Steigungen der Fließgeraden und die kleinsten dynamischen Fließmomente auf. Diese Mikrosilika weisen zudem die höchsten Feinststoffanteile auf. Hier ist ein Zusammenhang erkennbar. Mischungen mit Sika zeigen das zweithöchste dynamische Fließmoment und die größte Steigung der Fließgeraden. Diese Mischungen weisen einen weit geringen Feinststoffanteil als "940", "971" und Microwhite auf. Bei den Mischungen mit Slurry ist dieser Zusammenhang nicht vorhanden.

## 4.6 Festbetoneigenschaften

Nach einem Tag in den Formen wurden die Probekörper entschalt und an Luft gelagert. Mit jedem Silika wurden 4 x 3 Probekörper hergestellt. Diese wurden in zwei Chargen gemischt. An den Proben wurde nach 24 h, 7 Tagen, 28 Tagen und 56 Tagen die Biegezug- und Druckfestigkeit jeweils an drei Proben geprüft. Im ersten Schritt wurde die Biegezugfestigkeit geprüft, im zweiten Schritt die Druckfestigkeit. Die Verfahren werden im Kapitel 2.2.2 auf Seite 30 beschrieben. Die Messwerte der Festbetonprüfungen sind der Arbeit im Anhang beigefügt.

### 4.6.1 Biegezugfestigkeit

Die Abb. 4.34, 4.35 und 4.36 zeigen die Verläufe der Biegezugfestigkeit der Mischungen. Da eine hohe Streuung der einzelnen Messwerte vorliegt, wird anfangs jede Mischung getrennt betrachtet bevor die Mittelwerte der verschiedenen Mischungen verglichen werden. Für den Vergleich innerhalb einer Mischung wurden jeweils die drei Messungen nach 24 h, 7 Tagen, 28 Tagen und 56 Tagen aufgetragen und der Streubereich farblich hinterlegt.

#### Mikrosilika "940" und "971"

Abb 4.34 zeigt die Messwerte der Mischungen mit "940" und "971". Die Kurve mit "940" zeigt bei der Eintagesfestigkeit einen Mittelwert von  $7,68 \text{ N/mm}^2$  und eine Abweichung von  $\pm 3 \%$ . Diese Streuung ist im Vergleich zu den anderen Mischungen sehr gering. Die 7 Tage-Festigkeit zeigt bereits eine Streuung von  $\pm 18 \%$ . Es ist zu erkennen, dass jeweils zwei Messwerte eher an der unteren Grenze der Bandbreite liegen und die gedachten Kurven der Messwerte annähernd parallel verlaufen.

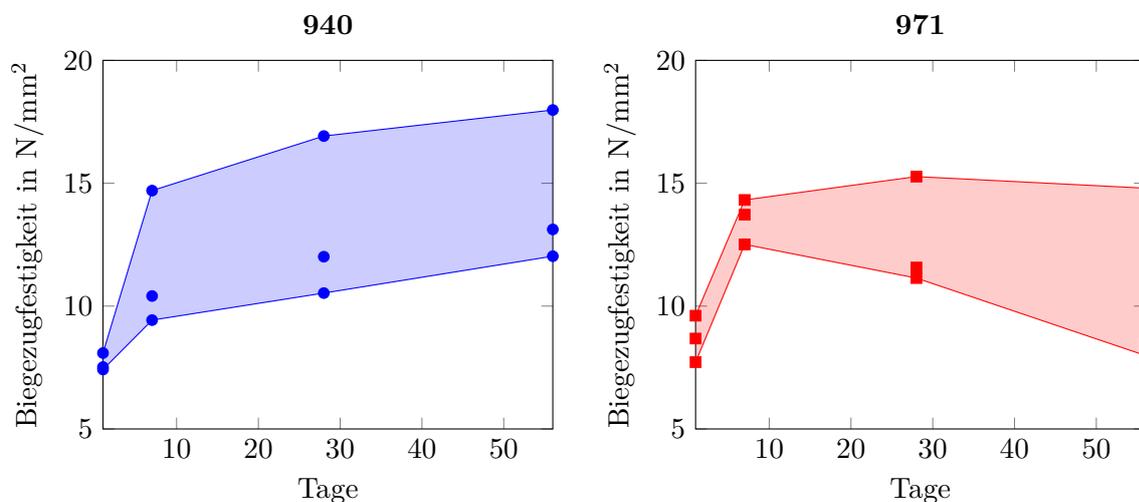
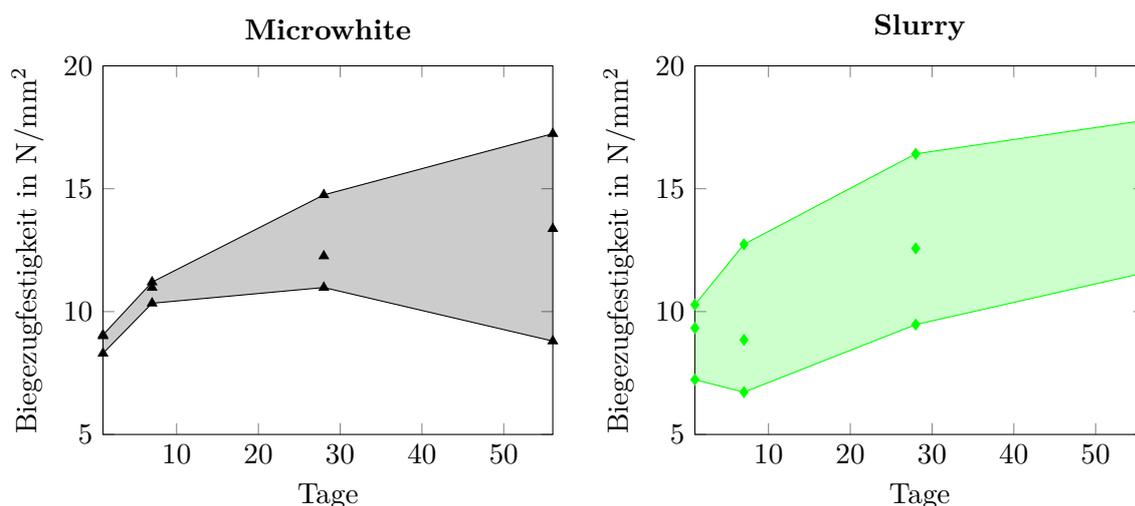


Abb. 4.34: Verlauf der Biegefestigkeit mit den Silika "940" und "971"

Die Graphik mit dem Silika "971" zeigt bei der 24 h-Festigkeit eine Streuung von  $\pm 11 \%$ . Es kommt zu einem fast konstanten Anstieg der Festigkeit bei der Messung am siebten Tag. Bei den Werten nach 28 und 56 Tagen kommt es zu einer größeren Streuung. Jeweils zwei Messwerte fallen stark ab. Im Mittel liegt die 28 Tage-Festigkeit bei  $12,66 \text{ N/mm}^2$  und die 56 Tage-Festigkeit bei  $10,43 \text{ N/mm}^2$ .

### Mikrosilika Microwhite und Slurry

Die Messergebnisse der Probekörper mit Microwhite und Slurry werden in Abb 4.35 dargestellt. Die Streuung zwischen den Messungen bei Microwhite nach 24 h und 7 Tagen verringert sich um 1 %, die mittlere Biegezugfestigkeit steigt von  $8,793 \text{ N/mm}^2$  auf  $10,843 \text{ N/mm}^2$ . Bei den späteren Messungen steigt die Streuung zuerst auf 13 % und dann auf 33 %. Die Verteilung der Messwerte erfolgt gleichmäßig. Der mittlere Messwert entspricht in etwa dem Mittelwert.



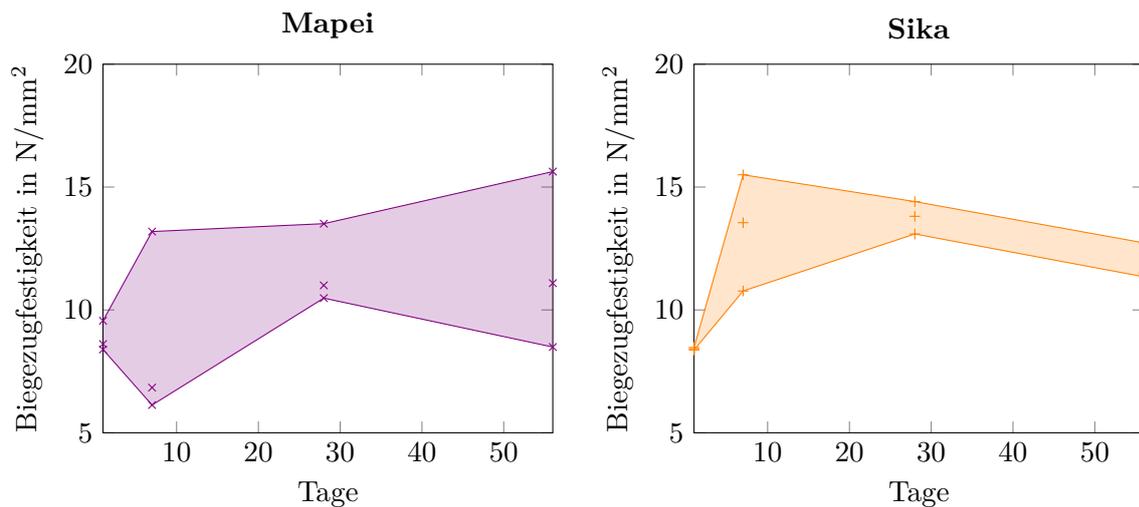
**Abb. 4.35:** Verlauf der Biegefestigkeit mit den Silika Microwhite und Slurry

Die Messwerte bei den Versuchen mit Slurry weisen bereits bei der 24 h-Festigkeit eine Streuung von  $\pm 19 \%$  auf. Es ist zu erkennen, dass der höchste Messwert der 24 h-Festigkeit nur um  $1,3 \text{ N/mm}^2$  geringer ist als der niedrigste Messwert der 56 Tage-Festigkeit. Die Messwerte weisen im Mittel eine stetige Steigung auf.

### Mikrosilika Mapei und Sika

Abb. 4.36 zeigt die Messwerte der Biegezugfestigkeit bei den Mischungen mit Mapei und Sika. Die Werte der Messungen mit Mapei weisen bei der 24 h-Festigkeit eine Streuung von  $\pm 5 \%$  auf. Zwei der drei Messwerte der 7 Tage-Festigkeit liegen unter den Werten der 24 h-Festigkeit. Bei

der 28 Tage-Festigkeit weisen die Werte eine Streuung von 10 % auf. Die Werte liegen im Mittel über denen der 24 h-Festigkeit. Der niedrigste Messwert der 56 Tage-Festigkeit liegt zwischen den unteren beiden Messwerten der 24 h-Festigkeit. Über die gesamte Messzeit ist zu erkennen, dass zwei der drei Werte jeweils im unteren Bereich näher aneinander liegen und der dritte markant höher liegt.

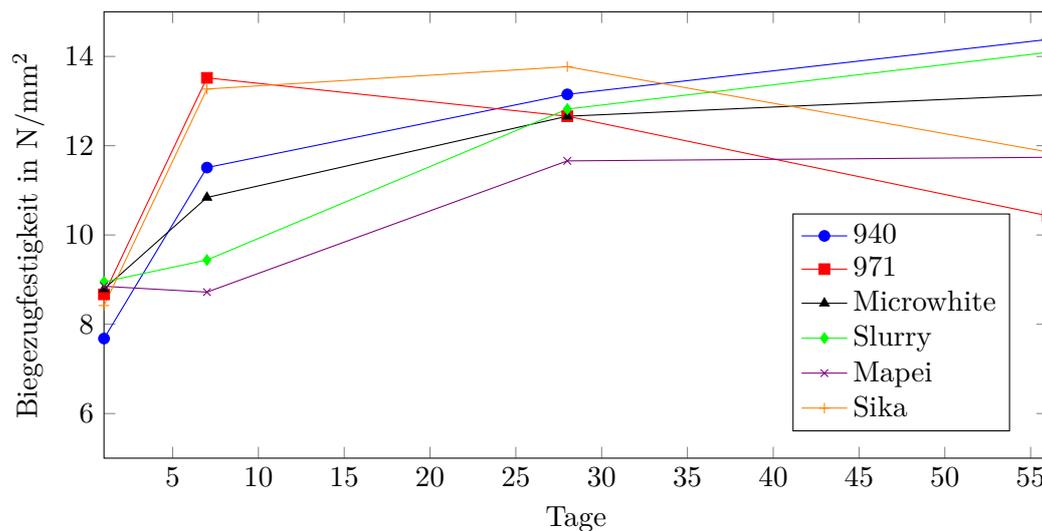


**Abb. 4.36:** Verlauf der Biegefestigkeit mit den Silika Mapei und Sika

Die Messwerte der Serie Sika weisen bei der 24 h-Festigkeit die geringste Streuung von nur 1 % auf. Die Biegezugfestigkeiten der Probekörper liegen nach 7 Tagen jeweils höher als nach 24 h, die Streuung beträgt 19 %. Der Mittelwert der 28 Tage-Festigkeit liegt um  $0,5 \text{ N/mm}^2$  höher als der Mittelwert der 7 Tage-Festigkeit, die Streuung beträgt 5 %. Die 56 Tage-Festigkeit liegt niedriger als die bei 28 Tagen, die Streuung bleibt etwa gleich.

### Vergleich und Interpretation

Die Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten werden in Abb. 4.37 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Festigkeiten der Mischungen mit den Mikrosilika "971" und Sika bis zur Messung am 7. Tag am stärksten ansteigen. Die Festigkeiten der Mischung mit "971" fällt im weiteren Verlauf stetig ab. Die Sika-Kurve steigt zur 28 Tage-Festigkeit geringfügig an und fällt zur 56 Tage-Festigkeit in etwa parallel mit dem Verlauf der Kurve von "971" ab. Die Kurve mit dem Silica Mapei zeigt bis zur 7 Tage-Festigkeit einen Abfall der mittleren Biegezugfestigkeit. Zwischen 7 und 28 Tagen steigt die Festigkeit im Mittel um ca.  $3 \text{ N/mm}^2$  an. Der weitere Anstieg erfolgt flacher. Die Verläufe von "940", Microwhite und Slurry zeigen jeweils einen stetigen Anstieg der Mittelwerte der Festigkeiten. Der Verlauf der Kurve mit "940" zeigt die größte Festigkeitssteigerung gefolgt

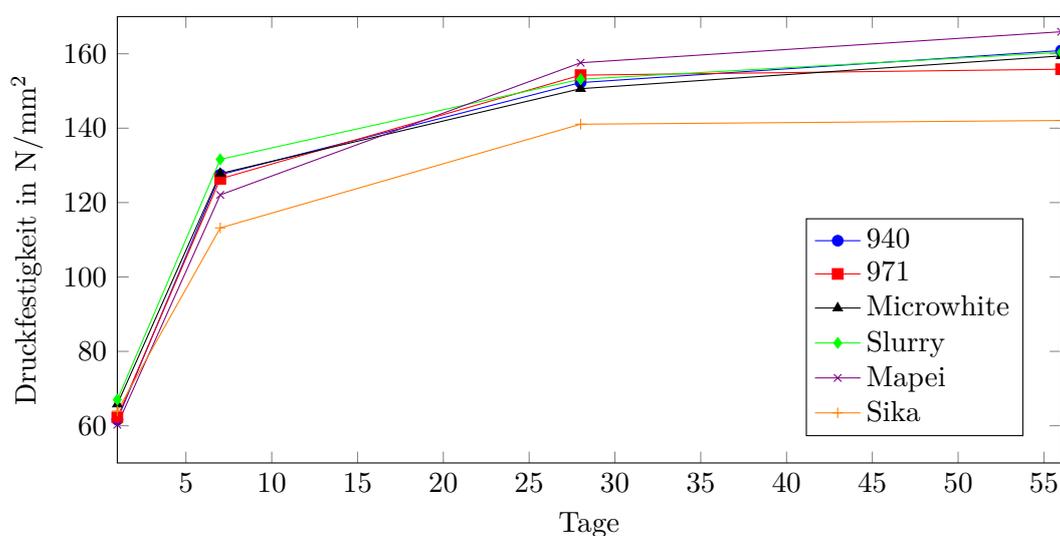


**Abb. 4.37:** Vergleich der mittleren Biegezugfestigkeiten

von der Mischung mit Slurry.

#### 4.6.2 Druckfestigkeit

Abb. 4.38 zeigt den Verlauf der Druckfestigkeit der Proben in Abhängigkeit der verwendeten Mikrosilika. Die Streuung bei den Druckversuchen ist geringer als bei den Biegezugversuchen. Die höchste Abweichung beträgt  $\pm 5,4\%$ . Aus diesem Grund werden nur die Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen verglichen.



**Abb. 4.38:** Vergleich der mittleren Druckfestigkeiten

Mapei zeigt mit  $60,27 \text{ N/mm}^2$  die geringste und Slurry mit  $67,02 \text{ N/mm}^2$  die größte 24 h-Festigkeit. Der größte Festigkeitsanstieg der Messungen von 24 h auf 7 Tage zeigt sich bei "940", der geringste bei Sika. Es ist gut zu erkennen, dass die Festigkeit der Mischung mit Sika ab der 7 Tage-Festigkeit unter den anderen Mischungen liegt, obwohl der Festigkeitsanstieg von 7 Tage auf 28 Tage nach Mapei der zweithöchste ist. Der Anstieg der Druckfestigkeit bei Sika zwischen 28 Tagen und 56 Tagen liegt bei  $1,01 \text{ N/mm}^2$ . Bei der Serie Mapei ist gut zu erkennen, dass der Abfall der Steigung gegenüber den anderen Mischungen relativ gering ist. Bei dieser Mischung wird die höchste Druckfestigkeit mit  $165 \text{ N/mm}^2$  nach 56 Tagen erreicht. Slurry zeigt zu Beginn den größten Festigkeitsanstieg. Die Kurve flacht sehr schnell ab und die Festigkeitswerte liegen nach 56 Tagen im Mittelfeld. Die Serie Microwhite zeigt bis zur 7 Tage-Festigkeit relativ hohe Werte, steigt jedoch bis zur 56 Tage-Festigkeit nur durchschnittlich und liegt bezüglich der Festigkeit im Mittelfeld. Die Serie "971" zeigt mit einer mittleren Festigkeit von  $62,25 \text{ N/mm}^2$  nach 24 h eine mittlere Steigerung. Zwischen 7 und 28 Tagen steigt die Festigkeit stark an. Die Kurve flacht jedoch zur 56 Tage-Festigkeit wieder ab. Serie "940" weist eine geringe 24 h-Festigkeit auf, jedoch durchgehend eine hohe bis mittlere Festigkeitssteigerung und entwickelt die zweithöchste Festigkeit nach 56 Tagen. Die 56 Tage-Festigkeitswerte liegen mit Ausnahme der Mischung mit Sika sehr nahe beisammen. Es ergibt sich dadurch kein wesentlicher Einfluss verschiedener Mikrosilika auf die Druckfestigkeit der Betone.

#### 4.6.3 Festbetonrohddichte

Die Festbetonrohddichte wird an den Probekörper vor den jeweiligen Biegezug- und Druckversuch ermittelt. Die Rohdichten aller Probekörper liegen zwischen  $2.267,39 \text{ g/dm}^3$  und  $2.333,72 \text{ g/dm}^3$ . Abb. 4.39 zeigt jeweils die minimalen und maximalen Rohdichten der jeweiligen Serien.

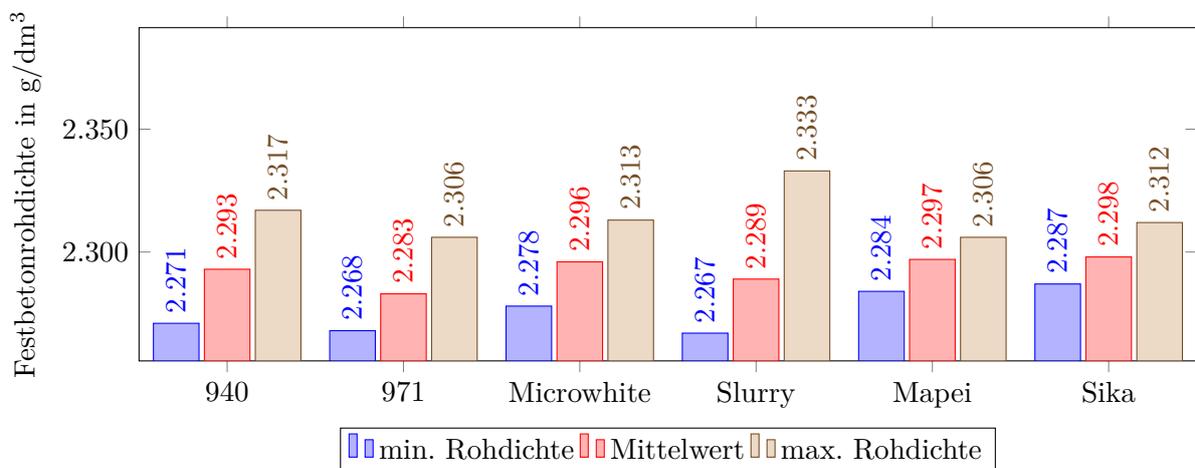


Abb. 4.39: Vergleich der Festbetonrohddichten

Die Probekörper mit dem Silika Mapei weisen die geringste Differenz zwischen minimaler und maximaler Rohdichte der Probekörper auf. Die größte Differenz ergibt sich mit  $66,34 \text{ g/dm}^3$  bei den Probekörpern mit Slurry.

#### 4.6.4 Interpretation

In diesem Kapitel wurden die Festbetoneigenschaften der einzelnen Serien miteinander verglichen. Zwei wichtige Parameter, welche in dieser Arbeit betrachtet werden, sind die Reproduzierbarkeit und die höchste Festigkeit. Die Serie mit dem Silika "940" weist bei der 56 Tage Biegezugfestigkeit im Mittel den höchsten Wert auf, die Streuung liegt dabei im unteren Bereich. "940" weist nach Mapei im Mittel die zweithöchste Druckfestigkeit auf. Die Festbetonrohndichte liegt sowohl bei der Streuung als auch bei der Höhe im mittleren Bereich. Beim Biegezug weist die Serie "971" im Mittel eine sinkende Festigkeit auf, die Streuung liegt im mittleren Bereich.

Tab. 4.9 zeigt eine Bewertung der Festbetoneigenschaften und jeweils die Streuung innerhalb der Proben. Für die Bewertung wurden die Daten der 56 Tage-Prüfung herangezogen. Bei den Rohdichten werden jeweils die Mittelwerte verglichen. Die Bewertung erfolgt im Vergleich zwischen den verschiedenen Mischungen, wobei hohe Festigkeiten und Rohdichten sowie kleine Streuungen mit "+" bewertet wurden.

**Tab. 4.9:** Bewertung der Festbetoneigenschaften

	Biegezug	Streuung	Druck	Streuung	Rohdichte	Streuung
940	+	~	+	+	~	-
971	-	-	+	~	-	~
Microwhite	~	-	+	+	+	~
Slurry	+	~	+	~	-	-
Mapei	-	-	+	+	+	+
Sika	-	+	~	-	+	+

Aus Tab. 4.9 ist zu erkennen, dass die Mischung mit Mapei bei der Druckfestigkeit als auch bei der Rohdichte hohe Werte im Vergleich zu den anderen Mischungen aufweist. Die Streuung in diesen beiden Bereichen ist gering. Im Bereich der Biegezugfestigkeit liegt es im unteren Bereich und weist im Vergleich eine hohe Streuung auf. Die Mischung mit Sika weist sowohl bei der Biegezugfestigkeit als auch bei der Rohdichte eine relativ geringe Streuung auf. Die Festigkeiten liegen im Vergleich jedoch im unteren Bereich.

Um die Reproduzierbarkeit späterer Versuche zu sichern, ist es wichtig dass die Streuung

innerhalb einer Serie so gering wie möglich gehalten wird. Die Mischung mit Sika weist als einzige Mischung bei zwei der drei Streuungswerte eine gute Bewertung auf. Die negative Bewertung der Steuerung bei der Druckfestigkeit zeigt, dass die Streuung im Vergleich zu den anderen Mischungen am höchsten lag. Diese Streuung beträgt 5,37 %. Aus der Sicht der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist daher eine Verwendung von Sika als Mikrosilika zu empfehlen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Betrachtung der Prüf- und Messwerte bei den verschiedenen Mischungen kann unter mehreren Gesichtspunkten erfolgen. Einerseits sind die notwendigen Eigenschaften für ultrahochfeste Betone von der jeweiligen Anwendung abhängig. Andererseits sollte beim Einsatz von Beton darauf geachtet werden, dass eine konstante Qualität mit dem Produkt erreicht werden kann. Diese Anforderung bedeutet nicht, dass die höchste Festigkeit oder der geringst mögliche Luftgehalt erreicht werden muss. Bei konstanter Qualität kommt es auch im Bereich der Laborarbeiten darauf an, dass bei wenigen Mischungen die Abweichungen relativ gering sein sollen. Ein Faktor bei der Herstellung von Betonen ist neben den gewünschten Eigenschaften auch die Wirtschaftlichkeit bei der Produktion. Die Mischungen sollen preiswert produzierbar sein. Hier sind Faktoren wie die Rohstoffe, aber auch die Mischzeit und die aufzuwendende Mischenergie zu betrachten.

In dieser Arbeit wurden die genannten Faktoren für eine Mischung ultrahochfesten Beton unter Berücksichtigung verschiedener Mikrosilika betrachtet. Bei den sechs verwendeten Mikrosilika zeigten sich in den verschiedenen Bereichen die Stärken und Schwächen jedes Materials. Im Folgenden wird auf jede Rezeptur eingegangen und die Resultate im kurzen beschrieben. Die Werte für die durchgeführten Messungen und Prüfungen sind in Tab. 5.1 zusammengestellt. Eine Analyse, ob die unterschiedlichen Ergebnisse auf die jeweilige Herstellung oder die chemische Zusammensetzung des Mikrosilikas zurückgeführt werden kann, ist infolge der Datenlage nicht möglich.

Die beiden Mischungen mit dem Mikrosilika "940" zeigten sowohl im Mittel die kürzeste Stabilisationszeit als auch die geringste Mischarbeit. Die Abweichungen bei den beiden Mischungen ist im Vergleich zu den Mischungen mit anderen Silica relativ groß. Die Abweichung bei der Mischarbeit der beiden Mischungen beträgt 8,6 %. Im Bereich der Frischbetoneigenschaften zeigen die Mischungen mit "940" sowohl gute Messwerte als auch im Vergleich normale bis geringe Abweichungen. Eine kurze Trichterauslaufzeit und ein großes Ausbreitmaß weisen gemeinsam mit einem kleinen dynamischen Fließmoment und einer kleinen Viskosität auf gute Verarbeitungseigenschaften und eine gute Verdichtbarkeit hin. Bei den Messungen der Biegezug- und Druckfestigkeit nach 56 Tagen weisen die Mischungen mit "940" im Mittel die höchsten Werte auf. Kapitel 4.6.1 auf Seite 80 zeigt, dass die Werte für die Biegezugfestigkeit im Mittel stetig steigen. Die Abweichungen bei den Festbetonprüfungen liegen im Mittel der gemessenen Proben. Die Ergebnisse mit den Mischungen "940" weisen durchgehen gute Werte bei mittleren Abweichungen auf und ist somit für weitere Untersuchungen zu empfehlen.

**Tab. 5.1:** Zusammenfassung der maßgebenden Prüf- und Messwerte

	940	971	Microwhite	Slurry	Mapei	Sika
<b>Mischen</b>						
Stabilisationszeit in Sek.	225,5	239	248	244	244	360,5
Abweichung in % vom MW	4,02	0,84	0,08	0,51	0,51	1,73
Mischarbeit in kWh/100 kg	820,93	934,55	1603,90	1104,72	1103,94	2939,26
Abweichung in % vom MW	8,16	4,99	0,68	1,39	3,61	2,05
<b>Frischbeton</b>						
Temperatur in °C	38	38	42	38	38	41
Trichterauslaufzeit in Sek.	43	57	38,5	-	124,5	136
Abweichung in % vom MW	4,65	15,79	1,30	-	12,45	0,74
Ausbreitmaß in cm	21,75	22,00	22,75	16,75	19,75	19,50
Abweichung in % vom MW	1,15	2,27	1,10	1,49	1,27	0,00
Rohdichte in kg/m <sup>3</sup>	2303,5	2301,0	2319,0	2314,5	2319,0	2305,0
Abweichung in % vom MW	0,02	0,17	0,04	0,15	0,04	0,04
Luftgehalt in %	4,25	4,25	4,05	4,55	4,35	4,65
Abweichung in % vom MW	1,18	5,88	3,70	5,49	1,15	1,08
<b>Rheologie</b>						
dyn. Fließmoment in Nmm	11,36	10,98	9,36	31,62	25,28	28,61
Abweichung in % vom MW	3,42	8,41	4,07	10,06	5,89	1,45
Viskosität in Nmm·min	82,14	88,32	85,43	93,73	103,74	129,19
Abweichung in % vom MW	2,17	2,65	0,12	5,89	3,21	0,92
<b>Festbeton (56d)</b>						
Biegezugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	14,38	10,43	13,14	14,09	11,74	11,86
Abweichung in % vom MW	16,32	23,39	33,01	17,83	27,66	4,30
Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	160,87	155,85	159,43	160,38	165,92	142,07
Abweichung in % vom MW	2,22	3,22	2,34	2,56	1,69	5,37

Die Stabilisationszeit bei den Messungen mit dem Mikrosilika "971" liegen mit Slurry und Mapei im Mittelfeld der betrachteten Mischungen. Die Mischarbeit liegt mit 934,55 kWh/100 kg im unteren Bereich. Sowohl bei der Stabilisationszeit als auch bei der Mischarbeit weist die Mischung mit dem Mikrosilika "971" sehr geringe Abweichungen auf. Die Werte der Trichterauslaufzeit, des Ausbreitmaßes, des dynamischen Fließmomentes und der Viskosität weisen auf eine gute Verarbeitbarkeit und eine gute Verdichtbarkeit hin, die Abweichungen zwischen den Messungen ist jedoch bei allen genannten Werten höher als bei den Mischungen mit dem Mikrosilika "940". Die mittlere Druckfestigkeit nach 56 Tagen liegt im Bereich jener mit dem Mikrosilika "940". Im Bereich der Biegezugfestigkeit zeigt sich, dass die Festigkeit im Mittel nach dem siebten Tag stetig fällt. Die Abweichung der einzelnen Messungen nach 56 Tagen beträgt 23,39 %. Die Ergebnisse unter Verwendung des Mikrosilikas "971" zeigen gute bis mittlere Werte mit relativ hohen Abweichungen. Durch die geringe Wiederholbarkeit der Ergebnisse ist diese Mischung nicht für weitere Versuche betreffend des Verhaltens bei unterschiedlichen Mischzeiten und variierender Mischreihenfolge zu empfehlen.

Für die Mischung mit dem Silica Microwhite musste die Mischdauer erhöht werden, da die gewünschte Konsistenz nach 240 Sekunden nicht erreicht wurde. Dies weist darauf hin, dass diese Mischung einen wirtschaftlichen Nachteil bei Massenproduktion aufweist. Durch die längere Mischdauer ergibt sich auch eine höhere Mischarbeit. Die Abweichungen bei der Stabilisationszeit und der Mischarbeit der beiden Mischungen ist sehr gering. Die Mischungen mit Microwhite weisen das geringste dynamische Fließmoment, eine relativ geringe Viskosität, die geringste Trichterauslaufzeit und ein relativ hohes Ausbreitmaß bei geringen Abweichungen auf. Diese Messwerte weisen auf eine gute Verarbeitbarkeit und eine gute Wiederholgenauigkeit hin. Die Biegezugfestigkeit liegt bei einer hohen Abweichung im Vergleich hoch und zeigt im Mittel eine stetige Steigung. Die Druckfestigkeit weist gute Werte bei einer durchschnittlichen Abweichung auf. Diese Mischung kann für weitere Untersuchungen empfohlen werden, da die Abweichungen in vielen Bereichen der genannten Prüf- und Messwerte gering ist.

Die Mischungen mit dem Mikrosilika Slurry liegen bei der Stabilisationszeit und der Mischarbeit sowohl bei den Werten als auch bei der Abweichung im Mittelfeld. Die Trichterauslaufzeit konnte bei den Versuchen mit Slurry nicht beurteilt werden, da bei der ersten Mischung der Frischbeton den Trichter verstopfte und keine Zeit gemessen werden konnte. Bei dieser Mischung zeigt sich das geringste Ausbreitmaß sowie das größte dynamische Fließmoment. Die Viskosität ist höher als

bei den bisher betrachteten Mischungen. Diese Werte weisen auf eine schlechte Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit hin. Die Abweichungen bei den beiden Messungen liegen im höheren Bereich. Die Festigkeiten bei den Biegezug- und Druckversuchen sind relativ hoch bei durchschnittlichen Abweichungen. Der Verlauf der Kurve bei den Werten des Biegezugs zeigt eine stetige Steigung. Die Mischung mit Slurry weist durchgehend mittlere bis hohe Abweichungen auf. Zudem ist der Einfluss auf die Mischung durch die geänderte Mischreihenfolge nicht geklärt. Das Verhalten der Mischung bei der Verwendung von Slurry als Mikrosilika kann gesondert in einer weiteren Arbeit betrachtet werden.

Die Mischungen mit Mapei weisen die selbe Stabilisationszeit und beinahe die selbe notwendige Mischenergie wie die Mischung mit Slurry auf. Die Abweichung bei der Mischenergie liegt jedoch bei Mapei höher. Die Mischungen weisen hohe Trichterauslaufzeiten, ein eher niedriges Ausbreitmaß, das höchste Fließmoment und eine hohe Viskosität auf. Die Abweichungen sind im Vergleich eher hoch. Dies weist auf eine schlechte Verarbeitbarkeit bei geringer Wiederholgenauigkeit der Ergebnisse hin. Die Biegezugfestigkeit weist eine große Streuung auf. Die Druckfestigkeit ist bei der geringsten Abweichung am höchsten. Durch die hohen Abweichungen bei den meisten Messwerten ist eine Verwendung der Mischung mit Mapei für weitere Versuche nicht zu empfehlen.

Um eine ausreichende Durchmischung sicherzustellen, wurde für die Mischungen mit Sika die Mischdauer um eineinhalb Minuten verlängert. Nach dieser Zeit war jedoch die Stabilisationszeit noch nicht erreicht. Durch die sehr lange Mischdauer ergibt sich mit Abstand die höchste Mischarbeit. Die Abweichungen bei den beiden Mischungen mit Sika liegen bei der Stabilisationszeit und bei der Mischarbeit im Mittelfeld. Die Mischungen wiesen hohe Trichterauslaufzeiten, geringe Ausbreitmaße sowie hohe Werte für die Viskosität und das dynamische Fließmoment auf. Es ergibt sich dadurch eine schlechte Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit. Die Abweichungen bei den genannten Prüfungen liegen durchgehend sehr niedrig. Die Mischungen mit Sika weisen bezüglich der Biegezug- und Druckfestigkeit relativ geringe Werte auf. Die Abweichung ist jedoch bei der Biegezugfestigkeit sehr gering. Obwohl die Abweichung bei der Druckfestigkeit im Vergleich am höchsten ist, liegt diese nur bei 5,37 %. Trotz der hohen notwendigen Mischdauer und -arbeit zeigen die Mischungen mit Sika nur geringe Abweichungen. Für Anwendungen, bei denen eine gute Verarbeitbarkeit nicht gefordert ist, kann die Mischung mit Sika empfohlen werden.

Für weitere Versuche kann durch die Erkenntnisse dieser Arbeit eine Verwendung der Mikrosilika "940" und Microwhite empfohlen werden. Bei der Verwendung mit Sika konnten auch gut

reproduzierbare Daten erreicht werden.

Diese Arbeit bildet die Forschungsgrundlage weiterer Versuche mit Mikrosilika, bei welchen unter anderem der Einfluss der Mischreihenfolge auf die jeweiligen Eigenschaften untersucht werden kann. Der Zusammenhang zwischen dem Verhalten der Mikrosilika unter Ultraschallbeaufschlagung und der Stabilisationszeit sowie der Mischarbeit ist ein weiteres untersuchungswürdiges Themenfeld, welches sich durch die Beobachtungen im Zuge dieser Arbeit aufgetan hat.

## 6 Anhang

**Tab. 6.1:** Frischbetoneigenschaften

		FB-Temp. [°C]	Trichter- auslaufzeit [Sekunden]	Ausbreit- maß [cm]	FB-Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	FB-Luftgehalt [%]
940	M1	38	45	21,5	2303	4,3
	M2	38	41	22	2304	4,2
971	M1	38	66	21,5	2297	4,5
	M2	38	48	22,5	2305	4,0
Microwhite	M1	42	38	23	2320	4,2
	M2	42	39	22,5	2318	4,2
Slurry	M1	38	nicht messbar	17	2318	4,8
	M2	38	360	16,5	2311	4,3
Mapei	M1	38	140	19,5	2318	4,4
	M2	38	109	20	2320	4,3
Sika	M1	41	137	19,5	2306	4,7
	M2	41	133	19,5	2304	4,6

**Tab. 6.2:** Festbetoneigenschaften der Mischungen mit "940"

Mischung	Probe- körper	d=h [mm]	b [mm]	l [mm]	V [dm <sup>3</sup> ]	m [g]	$\rho_{fest}$ [g/dm <sup>3</sup> ]	$f_{ct}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>940</b>									
09.05.2017	1	40,0	39,6	160,1	0,254	585,1	2307,2	7,42	61,61
24 h	2	39,9	39,9	160,1	0,253	582,7	2303,5	8,09	60,29
	3	40,1	39,8	160,0	0,255	584,7	2289,7	7,52	63,03
	MW							<b>2300,1</b>	<b>7,68</b>
15.05.2017	1	40,0	39,6	160,4	0,254	579,8	2282,0	9,43	130,04
7 d	2	40,0	39,2	160,3	0,251	575,3	2289,0	10,41	131,54
	3	40,0	39,5	160,4	0,253	580,3	2290,0	14,70	120,93
	MW							<b>2286,9</b>	<b>11,51</b>
06.06.2017	1	40,0	39,6	162,1	0,257	587,5	2288,1	12,01	153,10
28 d	2	40,0	39,2	162,0	0,254	588,6	2317,0	10,53	154,42
	3	40,0	39,5	162,0	0,256	587,1	2294,0	16,92	149,26
	MW							<b>2299,7</b>	<b>13,15</b>
04.07.2017	1	39,9	40,4	160,1	0,258	586,2	2271,0	13,12	161,31
56 d	2	39,9	39,5	160,1	0,252	580,0	2299,0	12,03	164,01
	3	39,9	39,7	160	0,253	579,8	2288,0	17,98	157,30
	MW							<b>2285,9</b>	<b>14,38</b>

**Tab. 6.3:** Festbetoneigenschaften der Mischungen mit "971"

Mischung	Probe- körper	d=h [mm]	b [mm]	l [mm]	V [dm <sup>3</sup> ]	m [g]	$\rho_{fest}$ [g/dm <sup>3</sup> ]	$f_{ct}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>971</b>									
09.05.2017	1	40,0	39,8	160,3	0,255	582,6	2282,9	8,68	62,81
24 h	2	40,0	40,3	160,2	0,258	592,0	2292,4	9,61	61,67
	3	40,0	39,6	160,2	0,254	577,8	2277,0	7,72	62,26
	MW							<b>2284,1</b>	<b>8,67</b>
15.05.2017	1	40,0	39,1	160,3	0,251	569,1	2270,0	12,51	126,62
7 d	2	40,0	39,5	160,4	0,253	574,9	2268,5	14,32	125,20
	3	40,0	39,0	160,3	0,250	569,9	2279,0	13,72	127,31
	MW							<b>2272,5</b>	<b>13,52</b>
06.06.2017	1	39,9	40,0	160,0	0,255	584,3	2288,1	11,57	156,94
28 d	2	39,9	39,9	160,0	0,255	583,9	2287,0	11,14	152,87
	3	40,0	40,1	160,0	0,257	586,6	2286,0	15,27	152,97
	MW							<b>2286,8</b>	<b>12,66</b>
04.07.2017	1	40,4	39,9	159,9	0,258	587,3	2278,5	8,50	165,37
56 d	2	39,9	39,8	159,9	0,254	580,7	2286,9	7,99	151,35
	3	39,1	39,6	160,0	0,248	571,5	2306,9	14,80	150,83
	MW							<b>2290,8</b>	<b>10,43</b>

**Tab. 6.4:** Festbetoneigenschaften der Mischungen mit Microwhite

Mischung	Probe- körper	d=h [mm]	b [mm]	l [mm]	V [dm <sup>3</sup> ]	m [g]	$\rho_{fest}$ [g/dm <sup>3</sup> ]	$f_{ct}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Microwhite</b>									
09.05.2017	1	40,0	39,4	159,7	0,252	580,7	2307,2	9,01	65,53
24 h	2	39,9	39,5	159,7	0,252	581,6	2310,7	9,05	66,99
	3	39,9	39,6	159,8	0,252	584,2	2313,8	8,30	64,90
	MW							<b>2310,6</b>	<b>8,79</b>
15.05.2017	1	39,9	39,7	160,2	0,254	585,9	2308,9	10,98	130,48
7 d	2	39,9	39,9	160,3	0,255	586,9	2300,0	10,34	126,74
	3	39,9	39,7	160,2	0,254	581,9	2293,0	11,20	126,24
	MW							<b>2300,6</b>	<b>10,84</b>
06.06.2017	1	40,0	39,9	159,9	0,255	584,5	2290,4	12,26	148,44
28 d	2	40,0	39,8	159,9	0,255	582,3	2287,5	10,98	153,50
	3	39,8	39,6	159,7	0,252	577,5	2294,4	14,75	149,92
	MW							<b>2290,7</b>	<b>12,66</b>
04.07.2017	1	40,1	40,0	159,8	0,256	584,0	2278,4	8,80	155,7
56 d	2	40,0	39,8	159,7	0,254	583,9	2297,0	13,37	163,64
	3	40,0	39,9	159,8	0,255	581,6	2280,0	17,24	158,95
	MW							<b>2285,2</b>	<b>13,14</b>

**Tab. 6.5:** Festbetoneigenschaften der Mischungen mit Slurry

Mischung	Probe- körper	d=h [mm]	b [mm]	l [mm]	V [dm <sup>3</sup> ]	m [g]	$\rho_{fest}$ [g/dm <sup>3</sup> ]	$f_{ct}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Slurry</b>									
09.05.2017	1	40,0	39,4	159,8	0,252	582,8	2314,1	9,33	66,3
24 h	2	39,9	39,4	160	0,252	587,0	2333,7	10,28	66,32
	3	40,0	39,3	160	0,252	580,5	2308,0	7,23	68,45
	MW						<b>2318,6</b>	<b>8,95</b>	<b>67,02</b>
15.05.2017	1	40,0	39,2	160,2	0,251	570,5	2271,2	6,72	133,42
7 d	2	40,1	39,6	160,5	0,255	581,8	2282,8	8,85	131,15
	3	39,8	39,5	160,4	0,252	575,6	2282,6	12,74	130,30
	MW						<b>2278,8</b>	<b>9,44</b>	<b>131,62</b>
06.06.2017	1	39,7	39,8	159,8	0,252	572,5	2267,4	9,47	153,02
28 d	2	39,9	39,4	159,9	0,251	572,9	2279,1	12,57	151,86
	3	39,6	39,5	159,8	0,250	574,0	2296,4	16,42	154,60
	MW						<b>2280,9</b>	<b>12,82</b>	<b>153,16</b>
04.07.2017	1	40,0	39,3	160,1	0,252	574,5	2282,7	12,92	157,17
56 d	2	40,0	39,6	160,2	0,254	577,1	2274,3	11,58	167,70
	3	40,0	39,8	160,2	0,255	580,9	2277,7	17,78	156,27
	MW						<b>2278,2</b>	<b>14,09</b>	<b>160,38</b>

**Tab. 6.6:** Festbetoneigenschaften der Mischungen mit Mapei

Mischung	Probe- körper	d=h [mm]	b [mm]	l [mm]	V [dm <sup>3</sup> ]	m [g]	$\rho_{fest}$ [g/dm <sup>3</sup> ]	$f_{ct}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Mapei</b>									
10.05.2017	1	40,0	39,7	160,4	0,255	587,6	2306,9	8,39	61,65
24 h	2	40,0	39,6	160,5	0,254	585,1	2301,4	8,61	58,93
	3	40,1	39,1	160,6	0,252	579,1	2299,8	9,56	60,23
	MW							<b>2302,7</b>	<b>8,85</b>
16.05.2017	1	40,0	39,8	161,9	0,258	591,2	2293,7	6,13	124,22
7 d	2	40,1	39,8	162	0,259	591,3	2287,0	13,19	117,05
	3	40,1	39,6	161,9	0,257	591,9	2302,3	6,84	124,93
	MW							<b>2294,3</b>	<b>8,72</b>
06.06.2017	1	40,0	40,0	160,2	0,256	587,6	2292,4	10,48	155,75
28 d	2	40,0	39,7	160,2	0,254	584,3	2296,8	11,00	156,84
	3	40,0	40,0	160,2	0,256	585,6	2284,6	13,51	160,17
	MW							<b>2291,3</b>	<b>11,66</b>
04.07.2017	1	40,0	39,4	160	0,252	580,1	2300,5	8,49	164,94
56 d	2	40,0	39,4	160,3	0,253	582,1	2304,1	11,09	169,70
	3	40,0	39,2	160,2	0,251	578,9	2304,6	15,63	163,11
	MW							<b>2303,1</b>	<b>11,74</b>

**Tab. 6.7:** Festbetoneigenschaften der Mischungen mit Sika

Mischung	Probe- körper	d=h [mm]	b [mm]	l [mm]	V [dm <sup>3</sup> ]	m [g]	$\rho_{fest}$ [g/dm <sup>3</sup> ]	$f_{ct}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Sika</b>									
10.05.2017	1	40,0	39,8	160,1	0,255	584,2	2292,1	8,47	64,39
24 h	2	40,0	39,9	160,1	0,256	589,1	2305,5	8,37	62,47
	3	39,8	39,8	160,1	0,254	584,1	2303,2	8,42	65,06
	MW						<b>2300,3</b>	<b>8,42</b>	<b>63,97</b>
16.05.2017	1	39,8	39,9	160	0,254	585,6	2304,8	13,55	112,92
7 d	2	40,0	39,7	159,8	0,254	584,0	2301,4	15,50	107,45
	3	39,6	39,5	160	0,250	576,6	2303,9	10,77	119,19
	MW						<b>2303,3</b>	<b>13,27</b>	<b>113,19</b>
06.06.2017	1	40,2	39,7	159,7	0,255	583,3	2288,6	13,81	145,09
28 d	2	39,7	39,8	159,7	0,252	577,2	2287,4	13,09	139,44
	3	39,0	39,2	159,7	0,244	564,5	2312,1	14,41	138,67
	MW						<b>2296,0</b>	<b>13,77</b>	<b>141,07</b>
04.07.2017	1	39,9	40,0	159,7	0,255	583,0	2287,3	11,50	134,45
56 d	2	39,9	39,2	159,5	0,249	573,2	2297,7	11,35	142,70
	3	39,6	39,5	159,8	0,250	573,8	2295,6	12,73	149,07
	MW						<b>2293,5</b>	<b>11,86</b>	<b>142,07</b>

## Literatur

- [1] Lins, M.: *Diplomarbeit: Verhalten von Ultrahochfesten Betonen (UHPC) unter Brandbeanspruchung (2004)*
- [2] Mazanec, O.J.: *Dissertation: Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen*
- [3] Locher, F.W.: *Zement, Grundlagen der Herstellung und Verwendung (2000)*
- [4] Schneider, U., Horvath, J.: *Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbeton (2003)*
- [5] ÖNORM EN 197-1:2014 07 15: *Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*
- [6] Verlag Bau+Technik GmbH: *Guter Beton, 23. Auflage (2010)*
- [7] Kirnbauer, J.: *Dissertation: Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Uötra High Performance Concrete (2013)*
- [8] Schneider, U.: *Wiener Baustofflehre Blätter (2010)*
- [9] Scholz, Hiese, Möhring: *Baustoffkenntnis (2016)*
- [10] Springenschmied R.: *Betontechnologie für die Praxis, 1. Auflage (2007)*
- [11] ÖNORM EN 206:2017 05 01: *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*
- [12] Duskanich R.: *Betonzusatzmittel, Wirkung, Anwendung und ökologische Eigenschaften (1996)*
- [13] Reschke, T.: *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton (2001)*
- [14] ÖNORM EN 12620:2015 07 15: *Gesteinskörnungen für Beton*
- [15] ÖNORM EN 12878:2014 05 15: *Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen - Anforderungen und Prüfverfahren*
- [16] Bendix, R.: *Bauchemie - Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten, 6. Auflage (2015)*
- [17] ÖNORM EN 450-1:2012 09 15: *Flugasche für Beton, Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien*

- [18] ÖNORM EN 15167-1:2007 01 01: *Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel, Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien*
- [19] Safranek, K., Schneider, U., Harand, H., Bruckner, H.: *Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone (2008)*
- [20] Schneider, Horvath, König, Dehn: *Materialverhalten von Ultrahochfesten Betonen (UHPC), Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001)*
- [21] Merkblatt Beton: *B4-Frischbeton Eigenschaften und Prüfungen, Ausgabe 03-2013, <http://www.beton.org/service/zement-merkblaetter/>*
- [22] Metzger T. G.: *Das Rheologie Handbuch (2016), 5. Auflage*
- [23] Handbuch: *Schleibinger Viskomat NT und Viskomat XL (2016)*
- [24] ÖNORM EN 459-2:2010 12 15: *Baukalk - Teil 2: Prüfverfahren*
- [25] ÖNORM EN 12350-9:2010 10 15: *Prüfung von Frischbeton, Teil 9: Selbstverdichtender Beton - Auslauftrichterversuch*
- [26] ÖNORM EN 12350-7:2009 07 15: *Prüfung von Frischbeton, Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren*
- [27] ÖNORM EN 196-1:2016 10 15: *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*
- [28] ONR 23303:2010 09 01: *Prüfverfahren Beton (PVB) - Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe*
- [29] Weinekötter R., Gericke H.: *Mischen von Feststoffen - Prinzipien, Verfahren, Mischer (1995), 1. Auflage*
- [30] Kraume M.: *Mischen und Rühren - Grundlagen und moderne Verfahren (2003), 1. Auflage*
- [31] Drees G., Krauß S.: *Baumaschinen und Bauverfahren (2002), 3. Auflage*
- [32] Heuer H., Gubany J., Hinrichsen G.: *Baumaschinen-Taschenbuch (1994), 4. Auflage*
- [33] König H.: *Maschinen im Baubetrieb - Grundlagen und Anwendung (2008), 2. Auflage*
- [34] 13.07.2017: <http://www.eirich.de/de/mischtechnik>
- [35] 26.03.2017: <http://www.unece.org/trans/danger/publi/ghs>

- [36] Wirtschaftskammer Österreich: *Folder: Das GHS-System in der EU, Neue Regelung für die Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien*, Download am 28.08.2017
- [37] 05.09.2017: <https://reach-clp-biozid-helpdesk.de>
- [38] 05.09.2017: <http://www.echa.eu/de>
- [39] Lafarge Zementwerke GmbH: *Produktdatenblatt Der Contagress, EN 197-1 - CEM I 52,5 N - SR O WT 38 C<sub>3</sub>A-frei* (Download am 3.10.2017)
- [40] Lafarge Zementwerke GmbH: *Sicherheitsdatenblatt Portlandzement, Version 6.00* (01.11.2015)
- [41] Elkem AS, Silicon Materials: *Product Data Sheet Elkem Microsilica Grade 940* (June 2017)
- [42] BASF Construction Solutions GmbH: *Sicherheitsdatenblatt ELKEM MS PULVER TYP: 940 U (SF), Version 3.1* (22.01.2016)
- [43] Elkem AS, Silicon Materials: *Product Data Sheet Elkem Microsilica 971* (February 2017)
- [44] Elkem AS, Silicon Materials: *Product Safety Information Elkem Microsilica, Revision 01* (14.11.2014)
- [45] Elkem AS, Silicon Materials: *Product Data Sheet Microwhite* (June 2017)
- [46] Elkem AS, Silicon Materials: *Product Safety Information Microwhite, Revision 03* (29.04.2016)
- [47] Elkem AS, Silicon Materials: *Product Data Sheet Emsac 500 SE slurry* (June 2017)
- [48] Elkem AS, Silicon Materials: *Product Safety Information Elkem Microsilica slurry EMSAC, Revision 03* (14.11.2014)
- [49] MAPEI S.p.A.: *Sicherheitsdatenblatt Mapeplast SF, Version 2* (04.03.2016)
- [50] Sika Österreich GmbH: *Sicherheitsdatenblatt SikaFume-HR/-TU* (30.06.2014)
- [51] BASF Performance Products GmbH: *Produktdatenblatt MasterGlenium ACE 430* (16.07.2015)
- [52] BASF Performance Products GmbH: *Sicherheitsdatenblatt MasterGlenium ACE 430, Version 1.1* (23.01.2017)
- [53] BASF Performance Products GmbH: *Produktdatenblatt MasterSure 911* (06.11.2013)

- [54] BASF Performance Products GmbH: *Sicherheitsdatenblatt MasterSure 911, Version 4.0 (15.02.2016)*
- [55] BASF Performance Products GmbH: *Produktdatenblatt MasterFinish DF 370 (29.10.2013)*
- [56] BASF Performance Products GmbH: *Sicherheitsdatenblatt MasterFinish DF 370, Version 2.0 (15.03.2016)*
- [57] Quarzwerke Österreich GmbH: *Datenblatt Quarzmehl, Amberger Kaolinwerke (AKW) (Juli 2003)*
- [58] Quarzwerke Österreich GmbH: *Datenblatt Stoffdaten (Februar 2009)*
- [59] Stangl. A.: *Diplomarbeit: Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton (2011)*
- [60] Mazanec O., Lowke D., Schießl P.: *Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time, Artikel in Materials and Structures 2010*
- [61] 07.07.2017: <http://www.schleibinger.com>
- [62] Stangl A.: *Diplomarbeit: Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton (2011)*