

DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone

ausgeführt am

Institut für Hochbau und Technologie

Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz

der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Hadubrand Harand

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

durch

Karin Safranek

E 610 / 0125591

Thomas Tamussino-Straße 16/9/9

2340 Mödling

Wien, 15. Mai 2007

.....

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien.

Ich danke Herrn *O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c Ulrich Schneider* für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an diesem Institut durchzuführen und weiters für die Bereitstellung der Laboreinrichtung und Baustoffe zur Durchführung der Versuche.

Weiters danke ich meinen Betreuern Herrn *Univ.Ass. Dipl.-Ing. Hadubrand Harand* und *Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner* für ihre fachliche Unterstützung sowie ihren zahlreichen Anregungen, die wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt ebenso *Ing. Hans Reschny, Mag. Dr.techn. Shangwei Chen* und *Ing. Karin Fussenegger*, sowie *Vertr.Ass. Dipl.-Ing. Monika Oswald*.

Wesentlicher Dank gilt meiner Laborpartnerin, Studienkollegin und Freundin *Bernarda Deninger*, mit der ich gemeinsam im Labor arbeitete und die mich immer unterstützte.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten, mich unterstützten und immer für mich da sind.

Zuletzt bedanke ich mich bei meinem Partner *Reinhard* für seine Hilfe und Unterstützung bei dieser Arbeit. Er ist stets für mich da und gibt mir die besondere Freude am Leben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen.....	6
2.1	Mischprozesse	6
2.1.1	Allgemeines.....	6
2.1.2	Verschiedene Mischarten.....	6
2.1.3	Normative Grundlagen	9
2.1.4	Mischgüter.....	12
2.1.4.1	Begriff der Homogenität	12
2.1.4.2	Bestimmung der Mischgüter.....	14
2.1.4.3	Ideale Mischung	17
2.1.5	Grundlagen – Mischertypen	18
2.1.5.1	Mischertypen.....	18
2.1.5.2	Historischer Rückblick.....	21
2.1.5.3	Herkömmliche Mischer – Eirich-Mischer	21
2.1.5.4	Leistungseintrag.....	23
2.1.5.5	Mischer für spezielle Anforderungen.....	25
2.2	Grundlagen – Ultrahochfester Beton (UHPC)	26
2.2.1	Allgemeines.....	26
2.2.2	Ausgangsstoffe	27
2.2.2.1	Zement.....	27
2.2.2.2	Zuschläge	29
2.2.2.3	Anmachwasser	31
2.2.2.4	Zusatzstoffe	32
2.2.2.5	Zusatzmittel.....	36
2.2.3	W/B-Wert.....	39
2.2.4	Herstellung von UHPC	41
2.2.4.1	Stoffraumrechnung	41
2.2.4.2	Mischen.....	42
2.2.4.3	Verdichten.....	43
2.2.4.4	Nachbehandlung.....	43
2.2.5	Erhärten von Hochleistungsbetonen	44
2.2.6	Festbetoneigenschaften.....	44

2.2.6.1	Homogenität.....	44
2.2.6.2	Druckfestigkeit	45
2.2.6.3	Biegezugfestigkeit.....	46
2.2.6.4	Porosität.....	46
2.2.7	Anwendungsgebiete.....	48
3	Versuchsplanung und Vorversuche.....	51
3.1	Vorbemerkungen.....	51
3.2	Mischungsaufbau	51
3.2.1	Sieblinie	51
3.2.2	Mischungsentwurf	54
3.2.3	Mischvorgänge.....	58
3.2.4	Prüfungsplanung	59
4	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	61
4.1	Allgemeines.....	61
4.2	Mischleistung	63
4.3	Frischbetonprüfung	70
4.3.1	Luftgehalt	71
4.3.1.1	Prüfverfahren	71
4.3.1.2	Ergebnisse	72
4.3.2	Ausbreitmaß.....	73
4.3.2.1	Prüfverfahren	73
4.3.2.2	Ergebnisse	74
4.4	Festigkeitsversuche.....	76
4.4.1	Probekörperherstellung und Lagerung.....	77
4.4.2	Druckfestigkeit.....	79
4.4.2.1	Prüfverfahren	79
4.4.2.2	Ergebnisse	80
4.4.3	Biegezugfestigkeit.....	92
4.4.3.1	Prüfverfahren	92
4.4.3.2	Ergebnisse	93
4.4.4	Porosität.....	99
4.4.4.1	Prüfverfahren	100
4.4.4.2	Auswertung und Ergebnisse	101
4.5	Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse	108

4.6	Interpretation	111
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	114
5.1	Resümee	114
5.2	Ausblick.....	117
6	Summary	119
7	Verzeichnisse	120
7.1	Literaturverzeichnis	120
7.2	Abbildungsverzeichnis.....	124
7.3	Tabellenverzeichnis.....	127
7.4	Gleichungsverzeichnis	127
7.5	Hinweise.....	128

1 Einleitung

Allgemeines

Die Geschichte des Mischens sowie die Geschichte der Betonherstellung reichen weit zurück. Schon bei den alten Römern gab es den so genannten *opus caementitium*, heute als Römischer Beton bezeichnet. Damit wurden druckfeste Bauteile aus wasserbeständigem Mörtel und Steinbrocken hergestellt. Das wohl berühmteste Bauwerk aus römischem Beton ist das Pantheon (Abbildung 1-1), dessen Kuppel eine Spannweite von 43 m aufweist [1].

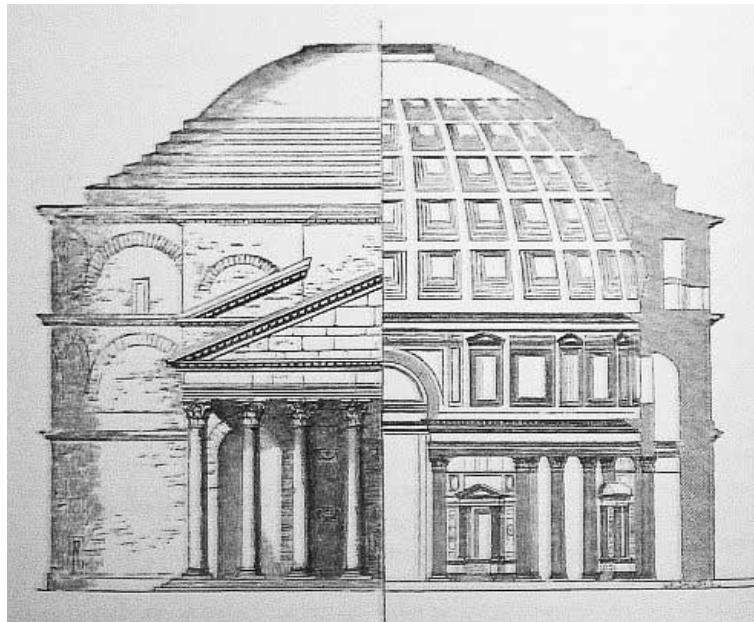


Abbildung 1-1: Pantheon in Rom [2]

Auch heute strebt man enormere Höhen und größere Spannweiten bei Gebäuden an. Einher mit dem Trieb nach immer Größerem, geht die Entwicklung nach immer besseren Baustoffen. So wurde im Laufe der Jahre die Druckfestigkeit von Beton immer weiter erhöht, was schließlich zu einem völlig neu entwickeltem Baustoff, dem ultrahochfesten Beton (kurz UHPC) führte.

Die ÖNORM B 4710-1 unterteilt die Betone gemäß ihrer Würfeldruckfestigkeit in die Betonklassen C8/10 bis C100/115. Bis zu einer Druckfestigkeit von rund 60 N/mm² spricht man von Normalbeton, Betone, die höhere Festigkeiten aufweisen, bezeichnet man als Hochleistungsbetone. Ultrahochfeste Betone weisen Druckfestigkeiten von bis zu 250 N/mm² auf (siehe dazu Abbildung 1-2). Ultrahochfeste Faserbetone können je nach Faserart und -menge sogar eine Druckfestigkeit von 800 N/mm² erreichen.

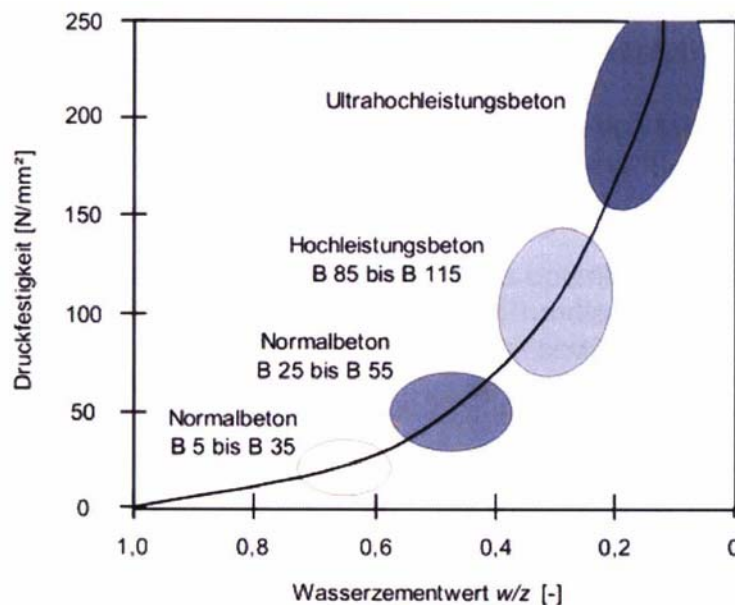


Abbildung 1-2: Spektrum der Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des W/Z-Wertes [3]

Damit es überhaupt möglich war die Festigkeit von Beton in so großem Ausmaß zu steigern, musste das ursprüngliche 3-Komponentensystem (Wasser, Zement und Zuschläge) erweitert werden. Erst die Einführung von Silikastaub als Betonzusatzstoff und der Einsatz von Fließmittel oder Verflüssiger als Zusatzmittel machten schließlich die zielsichere Herstellung von Beton mit einer Druckfestigkeit von über 100 N/mm² möglich [3]. Die Erweiterung auf ein 5-Komponentensystem revolutionierte den Werkstoff Beton und lässt ihn in mancher Hinsicht sogar mit Stahl konkurrieren.

Grundlage für die hervorragenden Eigenschaften des UHPC ist die Reduktion des W/B-Wertes unter 0,2 sowie die Homogenisierung des Betongefüges. Um Letzteres zu erreichen, wurde im Zuge der Forschung nicht nur die Betontechnologie

verbessert, sondern auch die Mischtechnik laufend aktualisiert und den speziellen Anforderungen angepasst.

Im Vergleich zu Normalbeton wird UHPC wesentlich länger gemischt, da es wichtig ist, eine optimale Homogenität zu erreichen. Es ist notwendig, dass im Beton die feinen Körner als Einzelkörner vorliegen und keine Agglomerate bilden. Dies ist wichtig für eine gute Verarbeitbarkeit und eine hohe Festigkeit [4].

Moderne Mischer sind computergesteuert und lassen sich auf jeden Werkstoff individuell anpassen. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Mischtrommel dreht, sowie die Drehrichtung sind regulierbar. Ebenso lassen sich verschiedene Mischprofile erstellen, in denen der Werkstoff in einer bestimmten Abfolge von Geschwindigkeits-Zeit-Kombinationen gemischt wird.

Aufgabenstellung

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen unterschiedlicher Mischleistungen auf die Festigkeit von ultrahochfesten Beton festzustellen. In den österreichischen Normen ist der Mischvorgang bei der Herstellung von Beton nicht eindeutig definiert. Um nun die Auswirkung unterschiedlicher Mischgeschwindigkeiten und auch unterschiedlich langer Mischdauern auszuweisen, wurden verschiedene Proben aus UHPC hergestellt. Dieser Baustoff wurde als Versuchsmaterial aufgrund seiner zuvor genannten Eigenschaften und den damit verbundenen hohen Ansprüchen an eine gute Mischung und Verarbeitbarkeit gewählt.

Ziel

Ziel der vorliegenden Arbeit ist ein Vergleich der Festigkeit von ultrahochfesten Betonen gleicher Rezeptur aber unterschiedlicher Mischleistung bei der Herstellung. Dabei besteht die Aufgabe nicht darin, möglichst hohe Endfestigkeiten zu erreichen, sondern die Mischung auf den Werkstoff optimal abzustimmen. Es galt herauszufinden, welche Kombination von Mischdauer und -geschwindigkeit die bestmögliche Homogenität in der Gefügestruktur des UHPC liefert.

Vorgangsweise

Die Arbeit gliedert sich in zwei wesentliche Teile: den theoretischen und den praktischen Teil.

Im theoretischen Teil werden zuerst die Grundlagen des Mischprozesses und die Arten der Mischmaschinen erklärt. Im Weiteren wird der Werkstoff UHPC vorgestellt und es wird auf die wesentlichen Merkmale eingegangen.

Der praktische Teil umfasst die Arbeit im Labor, die Auswertung der Ergebnisse und deren Interpretation. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der im Laufe der durchgeführten Arbeit gewonnenen Erkenntnisse.

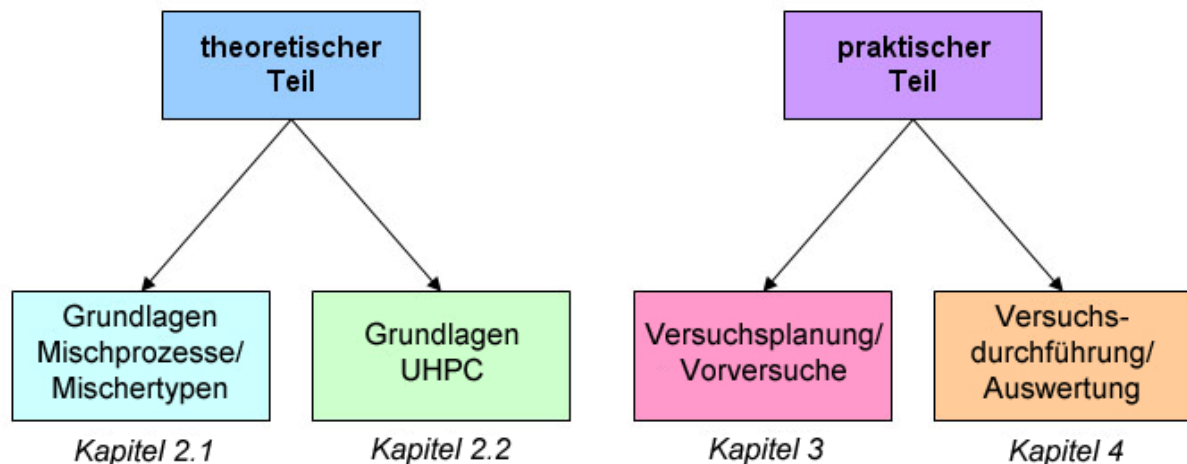


Abbildung 1-3: Gliederung der Arbeit

Ad Kapitel 2.1:

Es ist wesentlich, vorerst zu erklären, was in einem Mischprozess geschieht und die Begriffe Homogenität, Mischgüte und ideale Mischung zu erklären, bevor der praktische Teil in Angriff genommen wird. Kapitel 2.1 beschäftigt sich mit dem soeben Genannten und zählt weiters eine Reihe von Mischgeräten, speziell für die Betonherstellung, auf und beschreibt diese genauer.

Ad Kapitel 2.2:

In Kapitel 2.2 werden die Ausgangsstoffe für UHPC ausführlich dargestellt, sowie die Herstellung, Eigenschaften und Anwendungen beschrieben.

Ad Kapitel 3:

Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem Mischungsentwurf, der der Diplomarbeit von *Michael Lins* entnommen wurde. Weiters werden die Erfahrungen aus den Probemischungen ausgewertet und es wird ein genauer Zeitplan zur Durchführung der praktischen Versuche erstellt.

Ad Kapitel 4:

Die Versuche werden entsprechend dem Versuchsplan durchgeführt, ausgewertet und die Ergebnisse interpretiert. Es werden Prüfungen an Frisch- sowie an Festbeton durchgeführt und es wird mittels Quecksilberporosimetrie die Porosität einiger Probekörper untersucht.

Weiters werden die Aufzeichnungen der Mischmaschine ausgewertet und als Mischleistung und Mischarbeit dargestellt.

2 Grundlagen

2.1 Mischprozesse

2.1.1 Allgemeines

Das Mischen ist eine der ältesten Grundoperationen der Verfahrenstechnik. Schon in früher Zeit wurden Brotteige geknetet oder Breie gerührt. Auch im Baubereich wurden schon sehr früh Mörtel und Farben gemischt.

Heute ist die Mischtechnik aktuell wie nie zuvor. Es gibt fast keine Stoffe oder Produkte, die nicht in irgendeiner Form auf dem Weg ihrer Erzeugung mit der Mischtechnik in Berührung gekommen sind. Einige Beispiele für Bereiche, in denen das Mischen groß geschrieben wird, sind die Baustoff-, Lebensmittel- oder auch die Pharmaindustrie.

Unter Mischen versteht man das Verteilen von Masseteilchen in einem vorgegebenen Volumen, wobei sich die Teilchen in wenigstens einer Eigenschaft unterscheiden [6]. Das Ziel einer Mischung ist die gleichmäßige Verteilung aller Komponenten. Man spricht von einer homogenen Mischung, wenn alle Komponenten in ihrer Konzentration ausgeglichen sind. Wenn die Stoffe einer zu mischenden Menge produktionsbedingt oder aufgrund der Rohstoffe in ihren Eigenschaften schwanken, bezeichnet man den Ausgleich der Schwankung Homogenisierung [7].

2.1.2 Verschiedene Mischarten

Der Mischprozess ist das Transportieren von Mischgutkomponenten. Dabei werden zwei wesentliche Mechanismen unterschieden: Dispersion und Konvektion. Der Mischvorgang kann als Überlagerung beider Mechanismen vereinheitlicht werden.

Die Dispersion ist der vollkommen zufällige Platzwechsel einzelner Stoffkomponenten. Bei der Konvektion hingegen wird die gesamte Materialmenge fortlaufend geteilt und nach einem Platzwechsel wieder vermengt [7]. Siehe dazu Abbildung 2-1.

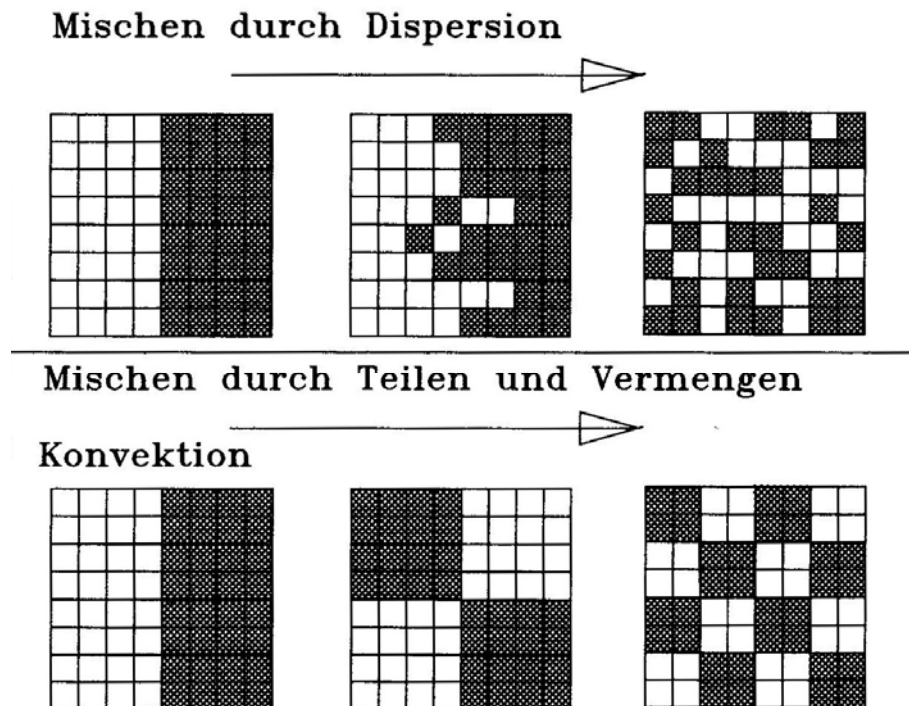


Abbildung 2-1: Mechanismen des Mischens [7]

Beim Mischprozess, zusammengesetzt aus Dispersion und/oder Konvektion, werden fünf einzelne Grundvorgänge unterschieden, die sich unter Umständen auch überlagern können.

Distributives Mischen

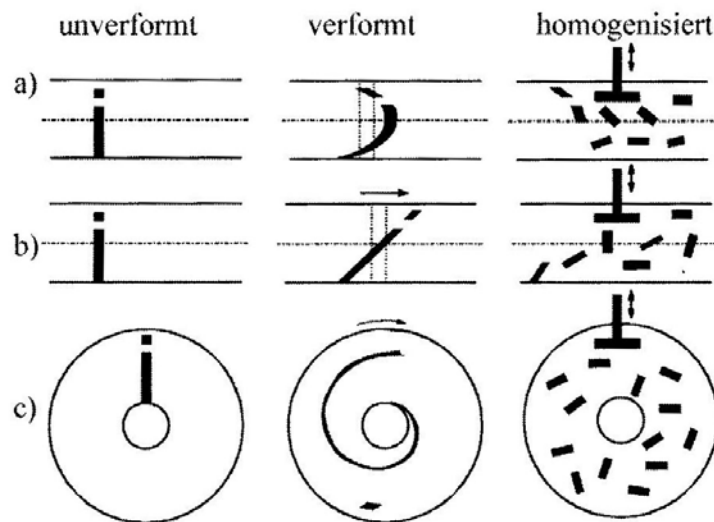
Dieser Mischprozess beschreibt eine einfache Lageänderung der Partikel. Es reichen geringe Scherkräfte aus, um nach genügend langer Zeit eine ausreichende Mischgüte zu erzielen. Ineinander lösliche Fluide und rieselfähige Schüttgüter werden distributiv gemischt.

Dispersives Mischen

Dispersives Mischen ist nicht nur Verteilen sondern auch Zerteilen, Inschwebehalten von Teilchen unterschiedlicher Dichte und Benetzen. Dazu sind höhere Scherkräfte oder Umwälzungsgeschwindigkeiten notwendig. Beispiele für dispersives Mischen sind Emulgieren, Desagglomerieren oder Suspendieren.

Laminares Mischen

Um den laminaren Mischvorgang zu erklären, stelle man sich eine Scherströmung zwischen (a) zwei ruhenden Platten, (b) einer ruhenden und einer bewegten und (c) eine Scherströmung in konzentrischen Zylindern vor.



Modelle zur Beschreibung des laminaren Mischens

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

Abbildung 2-2: Modelle zur Beschreibung des laminaren Mischens [6]

Die in Abbildung 2-2 eingezeichneten kleinen Fluidelemente verdeutlichen, dass eine Verschiebung der Komponenten senkrecht zu den Stromlinien auf diese Weise nicht erreicht werden kann [6]. Dies liegt daran, dass sich die Stromlinien bei einer laminaren Strömung nicht kreuzen. Laminares Mischen wird deshalb auch als Ausstreichen bezeichnet.

Eine vollständige Vermischung lässt sich nur dann erzielen, wenn zur Längsvermischung auch eine Quervermischung hinzukommt.

Laminar gemischt werden zum Beispiel zähe Flüssigkeiten, Pasten und Cremes.

Turbulentes Mischen

Am einfachsten ist das Vermischen unter Turbulenz. Dabei sind die Strömungen örtlich instationär und bilden dreidimensionale Wirbel. Die Bewegungen sind unregelmäßig, das heißt die Geschwindigkeit variiert nach Ort und Zeit.

Um die Turbulenz aufrecht zu erhalten, muss ständig Energie zugeführt werden. Dies geschieht zum Beispiel durch ein Rührwerkzeug in Form von Leistung. Dabei erzeugt die Förderwirkung des Rührers vorwiegend die Längsvermischung, wo hingegen die Turbulenz eine Quervermischung erzeugt.

Den Vorgang einer turbulenten Mischung kann man sich am besten beim Rühren von Wasser vorstellen.

Diffuses Mischen

Um verschiedene (flüssige) Teilchen miteinander zu vermischen, müssen Platzwechselvorgänge stattfinden. Diese erfolgen entweder durch reine Molekularbewegung oder durch Konvektion.

Die Diffusion ist der Ausgleich eines Konzentrationsunterschiedes. Sind in einem Raum Teilchen oder Energie ungleichmäßig verteilt, dann führt die ungeordnete thermische Bewegung der Teilchen mit der Zeit dazu, dass sie in diesem Raum statistisch gleichmäßig verteilt sind, ihre Konzentration also an jedem Messpunkt im Raum gleich hoch ist [8].

Ruhende Fluide werden diffus gemischt.

2.1.3 Normative Grundlagen

Bei der Herstellung von Beton ist eine große Menge an Anforderungen zu erfüllen. Die meisten Forderungen sind genau definiert. Bestimmte Abmessungen, Massen, Kräfte oder eine bestimmte Temperatur sind einzuhalten. Auch die Eigenschaften der Zemente, Zuschlagstoffe, des Anmachwassers, der Zusatzmittel und der Zusatzstoffe sind in Normen beschrieben und dem Verwender vorgegeben. Keinerlei bindende Vorgaben oder Normen gibt es jedoch für den Vorgang, in welchem diese Stoffe alle zusammengeführt werden: dem Mischen des Betons [9]. Es gibt keine Regelungen betreffend die Anforderung an das Mischen, die Mischwirkung und die Gleichförmigkeit des Betons. Die entsprechenden Abschnitte der ÖNORM B 3303 sind nach [10]:

ÖNORM B 3303 Abschnitt 4.3 Dosieren und Mischen:

Die Mischung muss in einem Labormischer so durchgeführt werden, dass eine homogene Mischung entsteht und keine Mischungsbestandteile verloren gehen.

ÖNORM B 3303 Abschnitt 6.9 Prüfung der Mischwirkung der Mischmaschine:

Die Prüfung der Mischwirkung der Mischmaschine gilt als bestanden, wenn bei der vorgesehenen Mischdauer und dem höchstens bei der Verwendung vorgesehenen Füllungsgrad die in 6.10 angegebenen Anforderungen an eine ausreichende Gleichförmigkeit erfüllt werden.

ÖNORM B 3303 Abschnitt 6.10 Prüfung der Gleichförmigkeit des Frischbetons:

Zur Prüfung der Gleichförmigkeit sind aus einem kontinuierlichen Mischgutstrom ... zwei mindestens 20 dm³ umfassende Proben zu ziehen.

... Die Proben sind vor Feuchtigkeitsverlusten zu schützen und unverzüglich an eine zur Prüfung geeignete Stelle zu bringen. Dort ist jede Probe für sich nochmals gut durchzumischen. Hierauf sind an beiden Proben folgende Prüfungen durchzuführen:

- (1) Konsistenz (Ausbreitmaß oder Verdichtungsmaß),
- (2) Rohdichte des Frischbetons,
- (3) Anteil der Gesteinskörnungen mit Korngrößen über 4mm durch eine Rücksiebung,
- (4) Bei Luftporen: Luftgehalt.

Das Mischgut weist eine ausreichende Gleichförmigkeit auf, wenn die Differenz der Prüfergebnisse an den beiden Proben die Grenzwerte gemäß Tabelle 2-1 nicht überschreitet.

Tabelle 2-1: Höchstzulässige Differenz der Prüfergebnisse [10]

Anforderungen	Höchstzulässige Differenz der Prüfergebnisse an beiden Proben
Konsistenz bei Verdichtungsmaß 1,40 bis 1,30	0,03
Ausbreitmaß bei Konsistenz F52	2 cm
Rohdichte des Frischbetons	40 kg/m ³
Anteil an Korn ≥ 4 mm	4 % der Probenmenge
Luftgehalt	1,0 % absolut

Abschnitt 4.3 der ÖNORM B 3303 besagt, dass der Beton so lange zu mischen sei, bis er homogen erscheint. Der Begriff homogen ist (in Kapitel 2.1.4 dieser Arbeit) zwar genau definiert, doch wie wird die Homogenität überprüft? Die fertige Betonmischung wird durch die Augen eines Menschen betrachtet. Dies ist eine

subjektive Messmethode und somit nicht geeignet, um reproduzierbare Produkte herzustellen.

Abschnitt 6.10 der ÖNORM B 3303 spricht von den Anforderungen an eine ausreichende Gleichförmigkeit. Um diese interpretieren zu können, muss vorerst das Wort definiert werden:

gleich|för|mig [Adj.] 1. von gleicher Form, die gleiche Form aufweisend; 2. eintönig, immer gleich [11]

Laut Definition muss also eine ausreichend gleiche Form des Betons vorliegen. Eine gleiche Form lässt sich laut Kapitel 6.10 der ÖNORM B 3303 durch das Ausbreitmaß, die Rohdichte, den Anteil bestimmter Korngrößen und den Luftgehalt messen.

Wenn also das Ausbreitmaß beider entnommenen Proben die gleiche Form aufweist, ist die Anforderung an die Gleichförmigkeit bestanden. Dem kann zugestimmt werden, allerdings hat das Ausbreitmaß wenig mit der Homogenität von Beton, von der in Kapitel 4.3 der ÖNORM B 3303 die Rede ist, zu tun. Folglich ist auch das Ausbreitmaß keine Messmethode für reproduzierbare Ergebnisse.

Die Rohdichte des Frischbetons, der Anteil an Gesteinskörnungen bestimmter Korngrößen und der Frischbetonluftgehalt haben ebenso wenig mit der Form des Betons, bzw. einer eintönig, immer gleichen Erscheinung, zu tun. Werden die in Abschnitt 6.10 der ÖNORM B 3303 angegebenen Frischbetonprüfungen durchgeführt und die Ergebnisse verglichen, so liefern sie Aussagen über die Konsistenz, die Betonzusammensetzung und den Luftgehalt, aber nicht über die Gleichförmigkeit und schon gar nicht über die Homogenität.

Wie also werden die beiden letzteren Anforderungen gemessen und in wie fern ist es überhaupt möglich Beton mit einer absoluten Gleichförmigkeit und einer idealen Homogenität herzustellen? In den folgenden Abschnitten werden vorerst die Begriffe definiert und danach mögliche Antworten gegeben.

2.1.4 Mischgüte

2.1.4.1 Begriff der Homogenität

Ein wichtiges Ziel bei Mischaufgaben ist das Erreichen einer vorgegebenen Mischgüte, sowie die Qualitätssicherung. Es gibt viele Faktoren, die einen Mischprozess beeinflussen. Sie lassen sich in vier Hauptgruppen unterteilen [6]:

- Maschineneinflussgrößen, wie Bautyp, Werkzeuggeometrie, und Ähnliches,
- Betriebseinflussgrößen, wie Füllgrad, Drehfrequenz, etc.,
- Produkteinflussgrößen, wie Viskosität, Löslichkeit, Koaleszenz, usw.,
- Umgebungseinflussgrößen, wie Druck und Temperatur.

Diese Einflussgrößen müssen erfasst und ausgewertet werden. Welche Parameter beeinflussen die Mischung positiv, welche negativ? Mit dem Wissen der Auswertung kann in weiterer Folge die Qualität gesichert und vor allem das Produkt in gleicher Qualität reproduziert werden.

Qualität bedeutet im Sinne der Mischtechnik Gleichmäßigkeit, oder anders gesagt Homogenität (siehe dazu Abbildung 2-3). Das Ziel jedes Mischvorgangs ist das Erreichen einer idealen Homogenität¹.



Abbildung 2-3: Schematische Darstellung von homogen und inhomogen [12]

Die ideale oder absolute Homogenität ist die totale Gleichheit des gesamten Stoffes. Im Bereich der Feststoffmischungen im trockenen oder feuchten Zustand gibt es

¹ Homogenität (griech.: *homos* gleich; *genos* Art; *homogenos*: von gleicher Art) bezeichnet die Gleichheit einer Eigenschaft über die gesamte Ausdehnung eines Systems, bzw. die Gleichartigkeit von Objekten, Erscheinungen, Elementen eines Systems [12].

keine absolute Homogenität. In diesen Konsistenzbereichen wird zwar im Makrobereich eine augenscheinliche Homogenität erreicht, im Mikrobereich liegt allerdings nur eine partielle Inhomogenität vor.

Ein Schachbrettmuster stellt eine ideale Mischung dar. Allerdings darf dabei nicht von einem Mischzustand gesprochen werden, sondern vielmehr von einem Verteilungszustand. Dies ist ein idealer Ordnungszustand. Der Zustand einer guten Mischung kann also nicht der einer idealen Ordnung, sondern nur einer völligen Unordnung sein [13]. Wenn man eine gleiche Anzahl und Größe an schwarzen und weißen Stoffelementen in einem Mischer schachbrettartig anordnet und danach den Mischer in Betrieb setzt, so würde man nach einer nicht definierten Mischzeit immer den Zustand einer völligen Unordnung erhalten. Eine genaue Anschauung dessen liefert Abbildung 2-4.

Die Abbildung zeigt verschiedene Mischzustände. Darstellung (a) charakterisiert den entmischten Anfangszustand. Bild (b) stellt die ideale Homogenität als eine gleichmäßige und geordnete Verteilung aller Komponenten einer Mischung dar. Dies ist nur dann möglich, wenn zum Beispiel Nahordnungskräfte wirken. Der Mischprozess in den meisten Maschinen läuft allerdings zufällig ab. Das heißt der bestmögliche Mischungszustand ist die homogene Zufallsmischung (f).

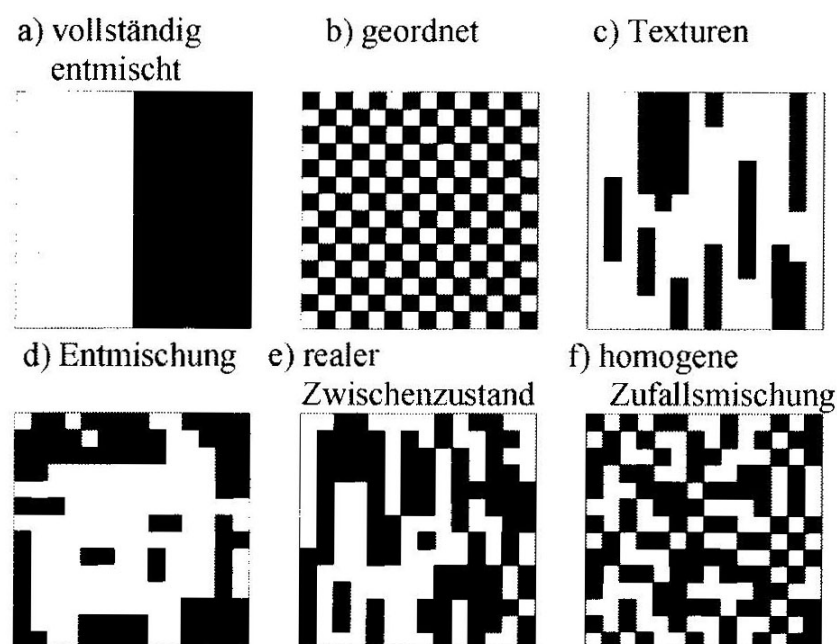


Abbildung 2-4: Verschiedene Mischzustände [6]

In Bild (c) sind Texturen erkennbar, diese sind zum Beispiel erwünscht, wenn man künstliche Maserungen erzielen möchte. Zustand (d) stellt die unerwünschte Entmischung an der Wandung dar. Bild (e) zeigt einen realen Zwischenzustand, der sich wahrscheinlich zwischen der idealen geordneten Mischung (b) und der homogenen Zufallsmischung (f) einstellt.

Oben Genanntes lässt sich kurz zusammenfassen: Absolute Homogenität herrscht nur in einem idealen Ordnungszustand, der allerdings durch den Prozess des Mischens nicht hergestellt werden kann. Der Endzustand nach einem Mischprozess entspricht einer völligen Unordnung, die im besten Fall zu einer homogenen Zufallsmischung führt.

2.1.4.2 Bestimmung der Mischgüte

Es ist notwendig die Mischgüte zu bestimmen, um [13]

- die Mischleistung verschiedener Mischer zu vergleichen,
- die fortschreitende Homogenisierungswirkung eines Mixers zu ermitteln und somit die optimale Mischzeit festzulegen,
- die praktisch erreichbare Homogenität zu ermitteln. Sie ist definiert durch die Standardabweichung S oder den Variationskoeffizienten V als indirektes Maß für die praktisch notwendige Homogenität (die Begriffe werden in diesem Kapitel erklärt),
- die praktisch erreichbare Mischgüte durch Feststellung bestimmter physikalischer Eigenschaften zu ermitteln.

Varianz als Maß für die Mischgüte

Um die Mischgüte zu erfassen, werden einer Mischung Proben entnommen und untersucht. Die Abweichung von der zu erwartenden Konzentration der Gesamtmischung wird durch die Varianz beschrieben.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Formel 2-1: Varianz [13]

σ_x^2Varianz (Streuung)

nAnzahl der Proben

$\bar{x}$Sollwert (Erwartungswert) der untersuchten Komponente

x_ibeobachtete Konzentration in der i - ten Probe

Die Varianz wird ermittelt, indem man die gesamte Mischung, auch Grundgesamtheit genannt, in n gleich große Proben aufteilt und in jeder Probe die Konzentration x_i bestimmt. Analysiert man nicht die gesamte Mischung, sondern nur eine beliebige Anzahl n über die Grundgesamtheit zufällig verteilte Proben, erhält man die so genannte Stichprobenvarianz S^2 . Sie ist ein Schätzwert für die Varianz σ^2 . Ist der Sollwert ebenfalls unbekannt, so wird er durch den arithmetischen Mittelwert μ der Konzentrationen ersetzt. Die Stichprobenvarianz errechnet sich dann wie folgt:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad \text{mit} \quad \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Formel 2-2: Stichprobenvarianz [13]

S^2Stichprobenvarianz

nAnzahl der Proben

μMittelwert der Konzentrationen

x_ibeobachtete Konzentration in der i - ten Probe

Die Qualität einer Mischung ist umso besser, je kleiner die Abweichungen von der Konzentration der Gesamtmischung sind. Eine möglichst kleine Varianz ist daher, um eine hohe Mischgüte zu erreichen, anzustreben. Aufgrund dieses Zusammenhangs wird die Varianz auch als Mischgüte bezeichnet.

Der Variationskoeffizient V ist eine Kenngröße zur Beurteilung der Homogenität eines Stoffes. Er errechnet sich aus der Standardabweichung und dem arithmetischen Mittelwert wie folgt:

$$V_x = \frac{S}{\mu} \quad \text{mit} \quad S = \sqrt{S^2}$$

Formel 2-3: Variationskoeffizient [13]

V_xVariationskoeffizient [%]

SStandardabweichung

μMittelwert

Praktische Anwendung – Probenentnahme

Bei der Probenentnahme sind einige Gesichtspunkte zu beachten. Je höher die Anzahl der entnommenen Proben, desto genauer ist die statistische Aussage. Die tatsächliche Varianz und die gemessene Stichprobenvarianz nähern sich einander. Weiters ist das Ergebnis stark von der Größe der Proben abhängig. Kleine Proben liefern ungenauere Ergebnisse als größere Proben. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass alle Proben gleich groß sind. Die Entnahmestellen müssen dem Zufall überlassen bleiben und dürfen keiner Ordnung entsprechen.

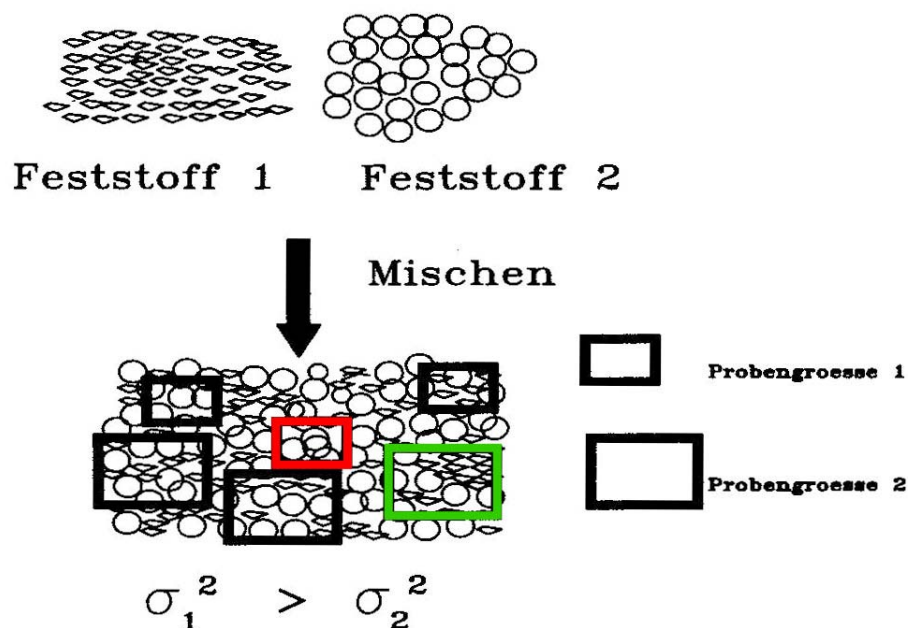


Abbildung 2-5: Einfluss der Probengröße auf das Maß der Mischgüte [7]

Abbildung 2-5 zeigt eine Zweikomponentenmischung. Eingezeichnet sind zwei unterschiedliche Probengrößen, sowie verschiedene Entnahmestellen. Die rot hervorgehobene Probe beinhaltet nur Feststoff 2. Würde die Probe größer sein, so

würde sie auch Feststoff 1 beinhalten. So aber erhöht sie die Varianz, da das Ergebnis dieser Probenuntersuchung keine Homogenität zeigen wird.

Anders sieht es bei der grün hervorgehobenen Probe aus. Die Untersuchung der Anzahl an Teilchen des Feststoffen 1 und der des Feststoffes 2 wird zeigen, dass sie jeweils gleich viel Platz einnehmen. Allerdings ist diese Probe nicht homogen, da Feststoff 1 und 2 nicht gleichmäßig verteilt sind. Die Varianz wird kleiner, die Homogenität ist aber nicht gegeben.

Dieses Beispiel bestätigt zuvor Genanntes: je größer die Probe und je höher die Anzahl der Proben, desto genauer wird das Ergebnis.

Die Probenauswertung kann nach zwei Methoden erfolgen [13]:

Direkte Auswertung der Proben:

- Auszählen der Teilchen,
- Aussieben der Teilchen bei verschiedener Korngröße der Komponenten,
- Entfernen einer Komponente durch chemisches Lösen,
- Ausbrennen oder thermisches Zersetzen einer Komponente.

Indirekte Bestimmung der Anteile:

- Verwendung radioaktiver Markierung; die Strahlungshöhe ist ein Maß für die Konzentration,
- Färben einer Komponente; die Farbskala ist ein Maß für die Konzentration,
- Photometrisches Auswerten der Konzentration.

2.1.4.3 Ideale Mischung

Wenn die Konzentration an jeder zufällig gewählten Stelle der Mischung in einer Probe beliebiger Größe gleich der Gesamtkonzentration ist, handelt es sich um eine perfekte Mischung [7]. Die Varianz der perfekten Mischung erreicht den Wert Null. Eine perfekte Mischung ist nur bei Gasen und Flüssigkeiten auf molekularer Ebene möglich, da der Probenraum um ein Vielfaches größer ist als die Bestandteile der Mischung.

Bei Feststoffmischungen kann es zu zwei Grenzzuständen kommen. In diesen ist die maximale Homogenität gleichbedeutend mit der minimalen Varianz. Diese Zustände

sind die geordnete Mischung und die homogene Zufallsmischung (siehe Kapitel 2.1.4.1).

Die geordnete Mischung ist, wie der Name schon sagt, eine Ordnung. Damit sich Mischungskomponenten ordnen können, sind Anziehungsvorgänge notwendig. Um einen geordneten Mischungszustand zu erreichen, müsste eine regelmäßige, geordnete Adhäsion der feinen Komponente auf der gröberen erfolgen [7]. Doch ein Mischvorgang ist immer ein Prozess, der Unordnung schafft.

Die homogene Zufallsmischung stellt ebenfalls einen Idealzustand dar. Es wird eine weißschwarze Zweikomponentenmischung betrachtet. Wenn die Wahrscheinlichkeit, ein weißes Element in einem Bereich der Mischung anzutreffen, genauso groß ist, wie die Wahrscheinlichkeit, ein schwarzes Element anzutreffen, ist die Zufallsmischung ideal.

2.1.5 Grundlagen – Mischertypen

Bei der Analyse eines Mischverfahrens, also der Auswahl eines Mischers, müssen folgende drei Fragen beantwortet werden [7]:

- Wie gut ist die Mischung?
- Wie schnell wird dieser Mischzustand erreicht?
- Wie hoch ist der erforderliche Leistungseintrag?

Für den Mischprozess von Feststoffen lassen sich diese Fragen bis heute nur experimentell beantworten. Die Experimente sind aufwendig und ihre Auswertung erfolgt mit statistischen Methoden (siehe dazu Kapitel 2.1.4.2).

2.1.5.1 Mischertypen

Chargenmischer

Chargenmischer werden im periodischen Betrieb eingesetzt. Man befüllt sie mit Mischgut, mischt eine bestimmte Zeit lang und entleert sie dann. Alle Mischgutbestandteile sind über einen bestimmten Zeitraum dem Mischprozess unterworfen. Der Nachteil von Chargenmischern ist die Gefahr der Entmischung (bei zu langer Mischdauer) [13].

Kontinuierliche Mischer

In kontinuierlichen Mixern werden große Mengen gleichartiger Produkte hergestellt. Die Komponenten werden genau dosiert und kontinuierlich dem Mixer zugefügt. Ein Mischgutpartikel wird vom Eingang in die Maschine bis zum Austritt transportiert. Die dafür benötigte Zeit ist abhängig vom Mischwerkzeug.

Mit kontinuierlichen Mixern lässt sich doppelt so viel Menge in derselben Zeit wie mit einem Chargemischer mischen, da die Zeit der Befüllung und Entleerung entfällt [13].

Mechanische Mischer

Zur Gruppe der mechanischen Mixer gehören alle, denen die Mischenergie mechanisch zugeführt wird. Dies erfolgt zum Beispiel über Schnecken, Knetschaufeln, Messer oder Rührer.

Weiters wird unter den mechanischen Mixern unterschieden zwischen solchen mit zwangsläufigen Mischbewegungen, den Freifallmischern, Rührwerken, Homogenisierungsmühlen und Schüttelmischer. Die letzten drei sind unwesentlich für die Betonherstellung, weshalb nicht näher darauf eingegangen wird [13].

Bei einem Freifallmischer rutscht das Mischgut eher zufällig ab und vermischt sich somit. Ein Zwangsmischer ist ein Mixer mit äußerem Antrieb. Dabei wird die Mischenergie über eine Welle und ein daran befestigtes Mischwerkzeug in das Mischgut eingebracht. Das Mischgut wird zwangsweise bewegt und durchgemischt. Zwangsmischer gelten als Mixer mit besonders guter Mischqualität, die aber wesentlich durch die Stellung der Schaufeln beeinflusst wird [9].

Die Gruppe der Zwangsmischer kann weiters in ihrer Wirkungsweise unterteilt werden in [13]:

- Schubmischer,
- Wurfmischer,
- Intensivmischer,
- Knetmischer.

Berücksichtigt man die Lage des Antriebs, wird wie folgt unterteilt [13]:

- Horizontale Mischwelle,
- Vertikale Mischwelle,
- Schräge Mischwellenlagerung.

Die Arten von Mixern werden bezeichnet als:

- Ein- und Doppelwellenmischer,
- Ringtrogmischer,
- Planetenmischer,
- Konusmischer,
- Tellermischer waagrecht oder schräg.

Weitere Mischer

Die mechanischen Mischer bilden die größte Gruppe der Mischgeräte. Daneben gibt es noch pneumatische Mischverfahren, Strömungsmischer, Schwingungsmischer, Silomischer und Sondermischer. Auf die soeben genannten Mischverfahren wird nicht näher eingegangen, da sie für diese Arbeit nicht relevant sind.

Einen Überblick über alle angeführten Arten von Mixern bietet Abbildung 2-6.

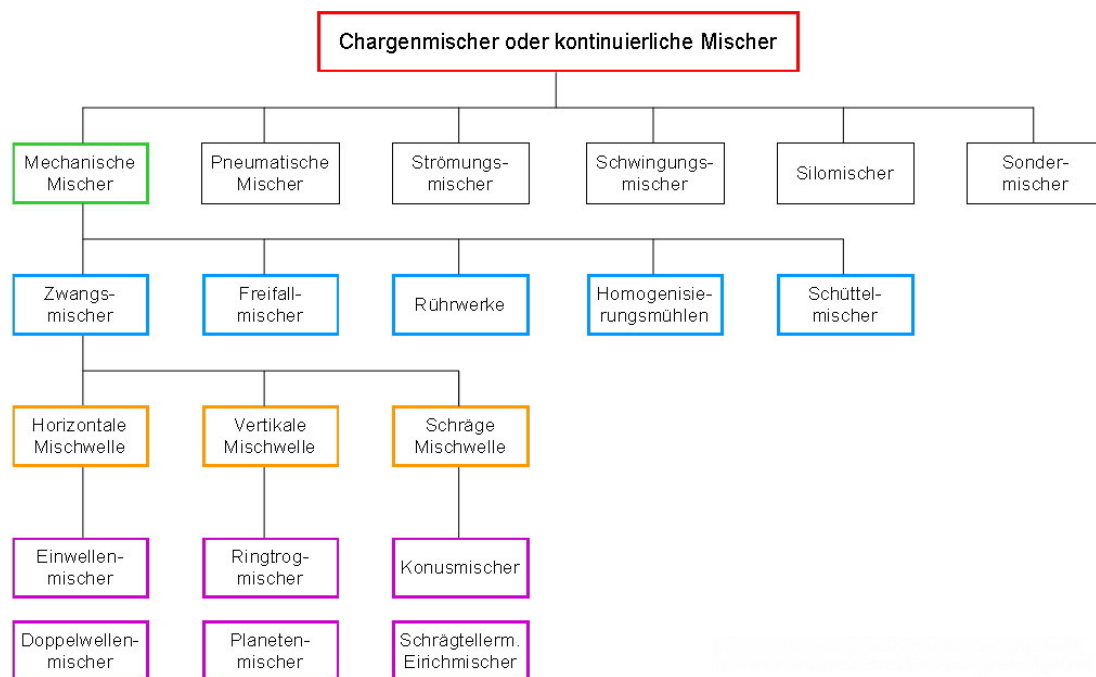


Abbildung 2-6: Überblick Mischertypen (in dieser Aufstellung sind nur die für die Arbeit relevanten Mischer in ihren Unterkategorien angeführt.)

2.1.5.2 Historischer Rückblick

Die Reihenfolge der in Kapitel 2.1.5.1 angeführten Aufzählung der Mischerarten ist chronologisch. Um 1870 wurden die bis dahin vorhandenen Freifallmischer vom ersten Zwangsmischer, dem Einwellenmischer abgelöst. Der Doppelwellenmischer entwickelte sich aus dem Einwellenmischer und brachte einen geringeren Wandverschleiß mit sich. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde der Ringtrogmischer erfunden. Dieser konnte erstmals Feinkornbeton ausreichend gut aufbereiten. Die Mischwirkung war allerdings immer noch nicht gut genug, und so wurde drei Jahre später der Planetenmischer erfunden. Der erste trichterförmige Mischer war der Konusmischer, der 1908 erstmalig eingesetzt wurde. Dieser hat sich bis heute durchgesetzt und wird in vielen Industrien verwendet [9].

2.1.5.3 Herkömmliche Mischer – Eirich-Mischer

Um die besonderen Merkmale des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Mixers der Fa. *Eirich* hervorheben zu können, werden vorerst die Unterschiede zu anderen Mixern erklärt [14].

Ringtrogmischer und Planetenmischer:

Die Mischwerkzeuge fahren langsam durch das ruhende Mischgut. Der Mischbehälter steht still. Die Materialbewegung ist im Wesentlichen durch Schubkräfte gekennzeichnet, nicht aber durch Wurfkräfte, Fliehkräfte oder freien Fall.

***Eirich*-Mischer schräg:**

Die Mischwerkzeuge fahren schnell durch das bewegte Mischgut. Der Mischbehälter dreht sich. Die Materialbewegung ist durch Wurfkräfte, Fliehkräfte und freien Fall gekennzeichnet, nicht aber durch Schubkräfte. Siehe Abbildung 2-7.

Der wesentliche Unterschied zwischen einem herkömmlichen Tellermischer (Ringtrog- oder Planetenmischer) und einem Mischer der Fa. *Eirich* sind die Schrägstellung und Rotation des Mischbehälters. Aufgrund der Drehbewegung wird das Mischgut zum Mischwerkzeug transportiert. Dieses ist nun nicht mehr auf Langsamlauf beschränkt, sondern kann beliebig schnell laufen.

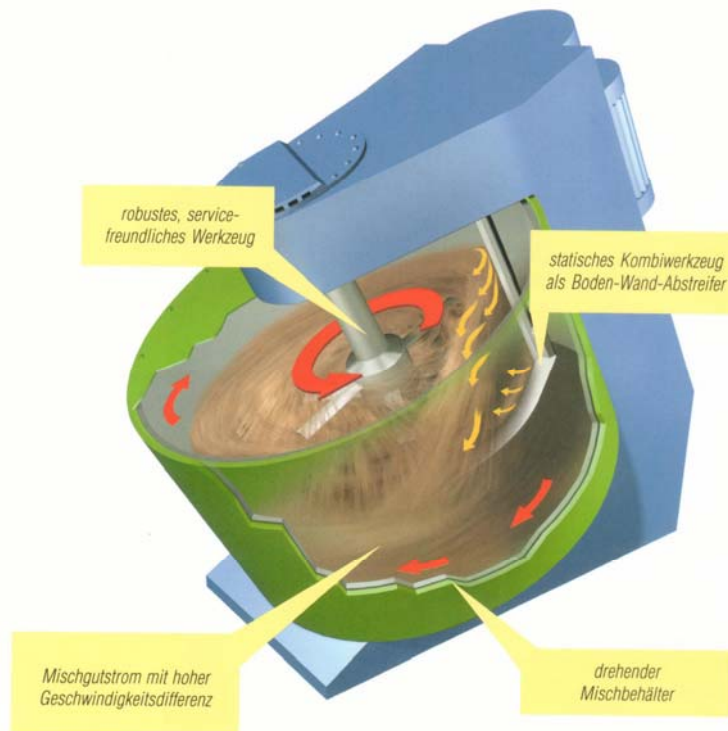


Abbildung 2-7: Mischprinzip eines *Eirich*-Mischers [15]

Der sich drehende Mischbehälter transportiert das Mischgut nach oben. Von dort fällt es aufgrund der Schwerkraft wieder nach unten. Unterstützt vom Wandabstreifer wird das Mischgut dem Wirbler zugeführt. Es ist möglich innerhalb einer Umdrehung des Mischbehälters 100 % des Mischgutes umzuwälzen. Der Wirbler kann Geschwindigkeiten bis zu 40 m/s erreichen.

Die Besonderheit des *Eirich*-Mischers ist, dass der Transport des Mischguts vom eigentlichen Mischvorgang entkoppelt ist. Diese Trennung zwischen Transport des Mischguts und dem Mischvorgang ermöglicht es, die Geschwindigkeit des Mischwerkzeugs und damit auch den Leistungseintrag in die Mischung zu variieren [9].

Ebenso kann bei einem *Eirich*-Mischer zwischen einem Gegenstrom- und einem Gleichstrom-Mischer unterschieden werden (Abbildung 2-8).

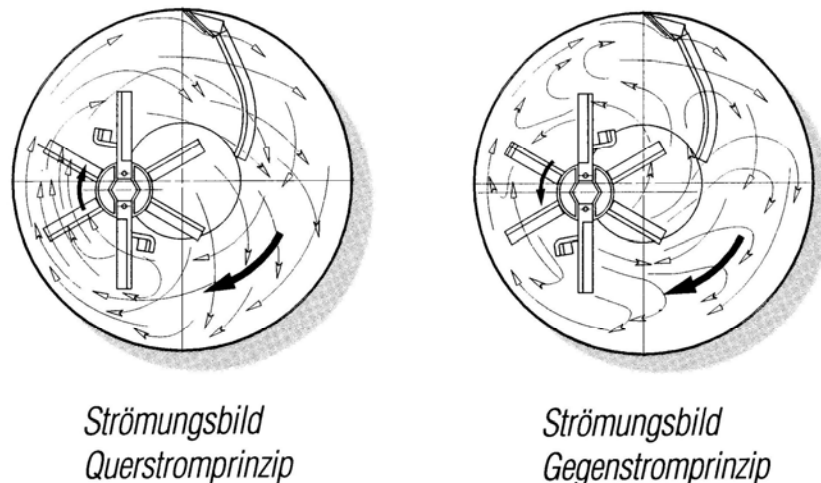


Abbildung 2-8: Strömungsbild in einem *Eirich*-Mischer [16]

Der praktische Teil dieser Arbeit wurde mit einem *Eirich* Intensivmischer durchgeführt, bei dem das Mischwerkzeug sowohl in Drehrichtung des Mischbehälters, als auch gegen die Drehrichtung des Mischbehälters steuerbar war. Um nicht allzu sehr von der bisherigen Methode der Betonherstellung in einem herkömmlichen Mischer abzuweichen, wurde der Drehsinn des Wirblers gleichläufig gewählt. Ein weiterer Grund für die gleiche Drehrichtung ist, dass auf diese Weise ein Maximum an Scherkräften in die Mischung eingebracht werden kann [9].

2.1.5.4 Leistungseintrag

Der Elektromotor eines Mixers erzeugt elektrische Arbeit, die als mechanische Arbeit in das Mischgut eingebracht wird. Dadurch wird eine Bewegung erzeugt. Die Bewegungsenergie der Mischwerkzeuge bewirkt eine Beschleunigungs- und eine Hubarbeit [14].

Bei einem einfachen Mischer steht der Behälter still. Das Mischgut wird über den Boden und die Wand geschoben, wodurch ein Teil der Bewegungsenergie der Mischwerkzeuge in Reibung und Verschleiß umgewandelt wird, und somit verloren geht. Je größer ein Mischer ist, desto mehr Werkzeuge werden benötigt. Je mehr Werkzeuge vorhanden sind, desto mehr Reibung und Verschleiß entstehen beim Mischvorgang. Die Reibung erhöht sich noch zusätzlich durch das Steigern der Geschwindigkeit der Mischwerkzeuge.

Bei einem *Eirich*-Mischer steht der Mischbehälter nicht still. Das Mischgut wird vom sich drehenden Behälter transportiert, weshalb es keine Geschwindigkeits-

unterschiede zwischen Mischgut und Behälter gibt. Reibung kann nur am Boden-Wandabstreifer auftreten. Allerdings ist die Geschwindigkeit des Mischgutes in diesem Bereich konstant langsam und ändert sich auch mit zunehmender Geschwindigkeit des Mischwerkzeuges nicht. Die in Reibung und Verschleiß umgewandelte Mischarbeit ist sehr klein und immer konstant.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Bei einem einfachen Mischer ist die Geschwindigkeit des Behälters Null. Die Bewegungsenergie der Mischwerkzeuge wird umgewandelt in Mischarbeit, Reibung und Verschleiß. Ein Wirbler-Mischer vom Typ *Eirich* hat einen rotierenden Mischbehälter, weshalb die Geschwindigkeit des Mischgutes gleich der des Behälters ist, und die Bewegungsenergie daher direkt der Mischarbeit entspricht.

Weiters ist die Mischenergie von der Konsistenz der Mischung abhängig. Bei konstanter Wirblergeschwindigkeit nimmt ein trockenes Mischgut wesentlich weniger Energie auf als ein feuchtes. Mit zunehmender Feuchte wird das Mischgut zur plastischen Masse. Siehe dazu Abbildung 2-9.

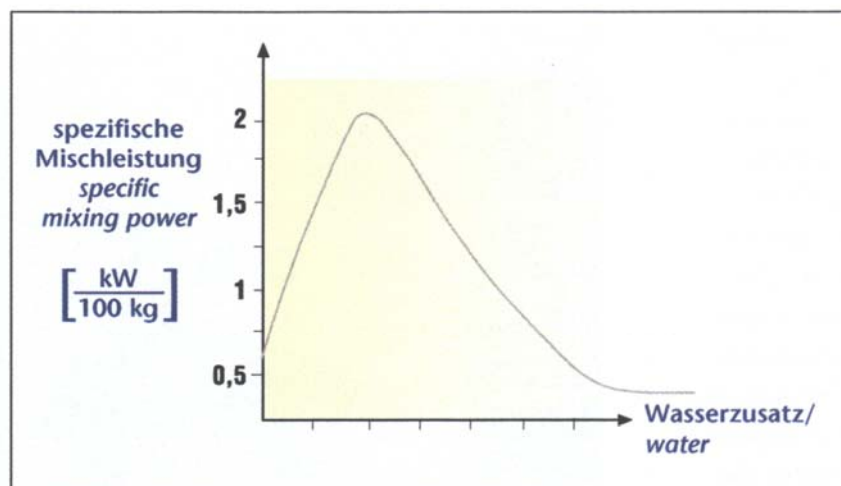


Abbildung 2-9: spezifische Mischleistung pro 100 kg Mischgut abhängig vom Wasserzusatz[14]

2.1.5.5 Mischer für spezielle Anforderungen

Bei ultrahochfesten Betonen ist es wünschenswert, den Luftgehalt im Beton auf ein Minimum zu reduzieren, und damit die Festigkeit zu steigern. Die während des Mischprozesses eingeführte Luft kann mit einem Vakkuummischer noch im Mischer wieder entfernt werden. Es ist notwendig, dieses Spezialverfahren anzuwenden, da die zähe bis honigartige Konsistenz der Hochleistungsbetone ein Entlüften durch Rütteln nicht zulässt. Bei der Vakuumtechnik wird am Ende des Mischprozesses der Druck für 30 Sekunden auf bis zu 50 hPa abgesenkt.

Die Innovationen in der Mischtechnik ermöglichen es, die immer höher werdenden Ansprüche der Betontechnologie umzusetzen.

2.2 Grundlagen – Ultrahochfester Beton (UHPC)

2.2.1 Allgemeines

„Hochleistungsbeton ist ein Beton, hergestellt aus geeigneten Materialien, verbunden mit einer ausgewählten Rezeptur; er wird entsprechend sorgfältig gemischt, transportiert, eingebracht, verdichtet und nachbehandelt. Der daraus resultierende Beton weist herausragende Eigenschaften im Bauteil auf, in der Umgebung, welcher er ausgesetzt ist und bei den Belastungen, denen er während seiner konzipierten Lebensdauer unterworfen ist [44].“

Ultrahochfester Beton ist ein besonders gefügedichter Beton mit einem Größtkorn von $< 1 \text{ mm}$ (siehe Abbildung 2-10). Aufgrund der Verwendung von sehr feinen Zuschlägen sowie der Zugabe von Mikrosilica als Füllstoff erzielt ultrahochfester Beton eine Druckfestigkeit von über 150 N/mm^2 . Diese Festigkeit kann durch die Zugabe von Stahlfasern noch weiter gesteigert werden.

Ein weiteres Merkmal von UHPC ist ein niedriger W/B-Wert. Um Werte $< 0,2$ erreichen zu können, und gleichzeitig eine gute Verarbeitbarkeit sicher zu stellen, müssen hochleistungsfähige Fließmittel beigemischt werden.

Aufgrund seiner feinen Bestandteile ist UHPC ein nahezu homogener Baustoff, der sich durch seine hervorragenden Eigenschaften bezüglich seiner Festigkeit und Dauerhaftigkeit auszeichnet.

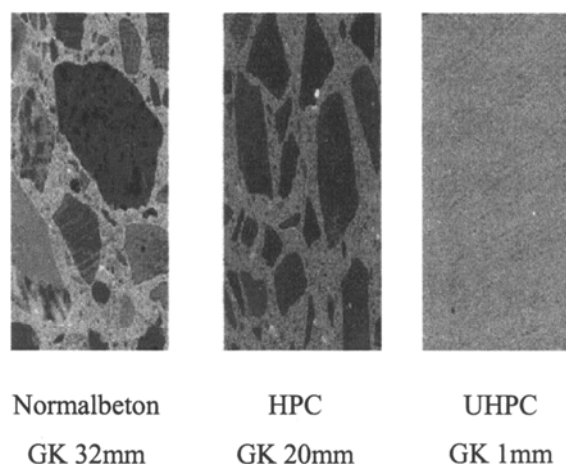


Abbildung 2-10: Vergleich der Mikrostruktur von Normalbeton, HPC und UHPC [18]

2.2.2 Ausgangsstoffe

Herkömmliche Betone bestehen aus drei Komponenten: Wasser, Zement und Zuschlägen. UHPC ist ein 5-Stoff-System. Neben den herkömmlichen Ausgangsstoffen sind außerdem Zusatzstoffe und Zusatzmittel für die Herstellung von Hochleistungsbeton erforderlich (Abbildung 2-11).

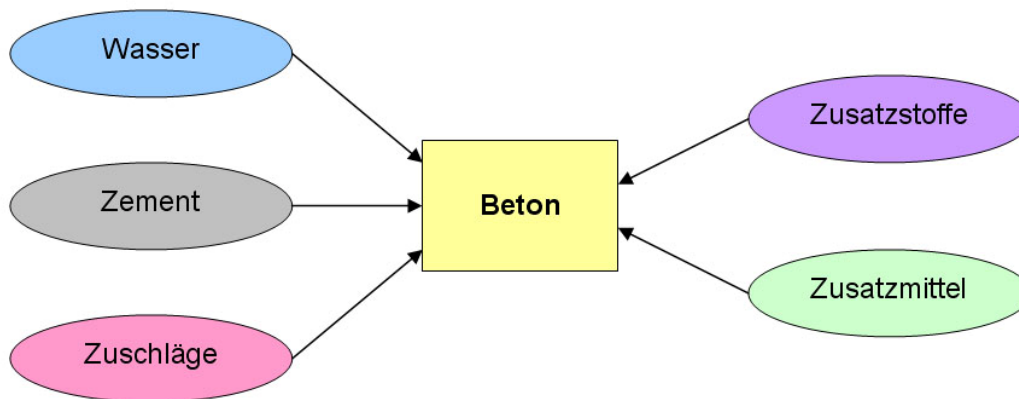


Abbildung 2-11: Beton als 5-Stoff-System

Auf den folgenden Seiten werden die Ausgangsstoffe von ultrahochfestem Beton kurz angeführt und ihre Wirkung erklärt.

2.2.2.1 Zement

Zement ist ein fein gemahlenes hydraulisches Bindemittel, das mit Wasser angerührt, sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärtet [19]. In seiner späteren Form als Zementstein ist er dadurch wasserbeständig und weist eine hohe Festigkeit auf.

Die Rohstoffe für die Herstellung von Portlandzementklinker umfassen:

- Kalkstein (CaCO_3),
- Sande (SiO_2),
- Tonerde und Mergel (Al_2O_3),
- eisenoxidische Minerale (Fe_2O_3).

Das Gemisch wird auf 800 °C vorerhitzt und danach in einem Drehofen durch das Brennen und Sintern bei ca. 1450 °C zu Zementklinker umgewandelt. Dabei entstehen vier grundsätzliche Klinkerphasen (siehe Tabelle 2-2), die jeweils unterschiedliche Beiträge zur Zementhärtung liefern [20].

Tabelle 2-2: Hauptklinkerphasen im Portlandzementklinker [21]

Mineral		Formel	Kurzform	Gehalt [%]
Tricalciumsilicat	Alit	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	40-80
Dicalciumsilicat	Belit	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	2-30
Tricalciumaluminat	Aluminat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	3-15
Calciumaluminatferrit	Aluminatferrit	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_2(\text{A},\text{F})$	4-15

Das Tricalciumsilicat C_3S gibt dem Zement seine wesentlichen Eigenschaften. Es erhärtet im Wasser sehr schnell und trägt wegen der hohen Hydrationswärme zur schnellen Frühfestigkeit sowie zu einer hohen Endfestigkeit bei.

Das Dicalciumsilicat C_2S erhärtet deutlich langsamer mit entsprechend geringerer Wärmeentwicklung. Es erreicht nach längerer Zeit eine ähnliche Festigkeit wie das C_3S und trägt somit ebenfalls viel zur Endfestigkeit bei.

Das Tricalciumaluminat C_3A reagiert sehr schnell mit dem Wasser und führt zu einer schnellen Versteifung, wodurch die Verarbeitbarkeit von Beton bzw. Mörtel beeinträchtigt wird.

Das Calciumaluminatferrit $\text{C}_4(\text{A},\text{F})$ hat auf die Festigkeitsentwicklung keinen Einfluss.

Die Auswahl der Zementart besitzt selbstverständlich auch für Hochleistungsbeton große Bedeutung für die Festigkeitsentwicklung, Endfestigkeit und seine Dauerhaftigkeit. Die Phasenzusammensetzung (Mineralbestand) und die Mahlfineinheit bestimmen dabei wesentlich die Festigkeitseigenschaften.

C_3S und C_2S sind die Hauptträger der Zementerhärtung und Festigkeitsbildung. Während diese bei Zementen für hochfeste Betone einen hohen Anteil ausmachen, dürfen von C_3A und $\text{C}_4(\text{A},\text{F})$ nur möglichst geringe Mengen vorhanden sein. Die beiden zuletzt genannten Bestandteile sind unter anderem für die Ettringitbildung verantwortlich. Ettringit bildet sich im Bereich zwischen Zuschlag und Zementstein aus und bewirkt durch seine weichere Eigenschaft eine Schwächung der Grenzfläche und somit auch einen Festigkeitsverlust [22] [23] [24] [44].

Verwendet man für Hochleistungsbetone C_3A freie Zemente, so wird die Ettringitbildung deutlich verringert. Es entsteht eine kompakte homogene

Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag, die wesentlich zur Festigkeitssteigerung des Betons beiträgt (siehe Abbildung 2-12).

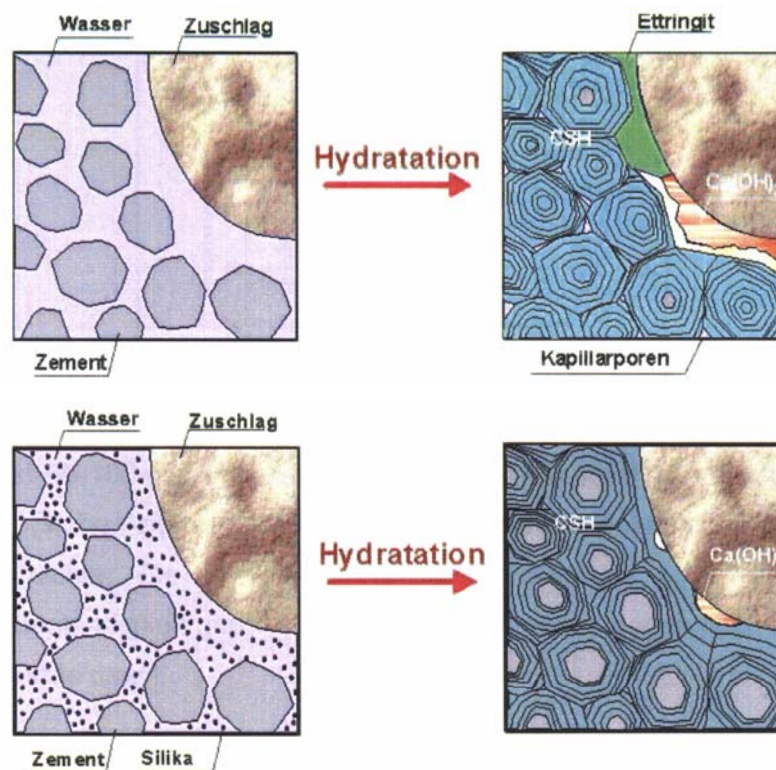


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der Zementhydratation von Normalbeton (a) und Hochleistungsbeton (b) [27]

Für die vorliegenden Versuche wurde ein C₃A freier Zement CEM I / H-S 42,5R verwendet.

2.2.2.2 Zuschläge

Ultrahochfester Beton lässt sich in vielen Varianten herstellen und so gezielt auf die jeweilige Anwendung anpassen. Beton mit größerem Größtkorn und mit gut korngestuftem Zuschlag benötigt aufgrund des geringen Hohlraumgehalts des Zuschlags weniger Bindemittel um zur Erzielung vergleichbarer Verarbeitungs- und Festbetoneigenschaften [26].

Weiters ist bei hochfesten Betonen mit hohen Zementsteinfestigkeiten auf eine ausreichend hohe Gesteinsfestigkeit zu achten. Für die durchgeführten Versuche wurden Zuschläge aus Quarz (Quarzsand und Quarzmehl) verwendet. Diese weisen eine Druckfestigkeit von bis zu 300 N/mm² auf und sind deshalb für die Herstellung eines ultrahochfesten Betons besonders gut geeignet [18] [27].

Quarzsand

Bei der Herstellung von UHPC werden die Zuschläge mit einem Größtkorn von 1 mm begrenzt. Dadurch ergibt sich eine sehr homogene und dichte Kontaktzone zwischen dem Zuschlagskorn und dem Zementleim. Zudem sollte die Kornverteilung der Zuschläge der modifizierten Fullerkurve entsprechen.

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,5}{D}\right)^n} \left[\left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0,5}{D}\right)^n \right]$$

Formel 2-4: Fullerkurve [4]

A ...prozentueller Siebdurchgang aller Feststoffe des Siebes
mit Siebweite d

D ...Größtkorndurchmesser des Zuschlaggemisches in mm

d ...Siebweite in mm

n ...Fullerexponent

Bei dieser Gleichung können Korndurchmesser unter 0,5 mm sowie das Weglassen einzelner Korngruppen bei so genannten Fehlkörnungen nicht berücksichtigt werden. Um diesen Anforderungen jedoch gerecht zu werden, werden im Falle von Fehlkörnungen trotzdem alle Korngruppen ermittelt und der Massenanteil der weggelassenen Korngruppen je nach Erfordernissen auf die beiden Nachbarskörnungen oder auch auf mehrere Korngruppen aufgeteilt.

Im Falle eines feineren Zuschlags mit einem Korndurchmesser $< 0,5$ mm wird die Formel folgendermaßen abgeändert:

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,25}{D}\right)^n} \left[\left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0,25}{D}\right)^n \right]$$

Formel 2-5: modifizierte Fullerkurve [4]

Die Berechnung der Sieblinie befindet sich in Kapitel 3.2.1.

Quarzmehl

Neben Sanden wird für die unteren Fraktionen ($< 125 \mu\text{m}$) auch Quarzmehl verwendet. Dabei wurde eine festigkeitssteigernde Wirkung der Quarzzusätze beobachtet. Der Grund für diese Wirkung liegt in der großen Oberfläche von Quarzmehl und der daraus folgenden Verringerung der Zementleimschichtdicken, was sich in einer generell höheren Druckfestigkeit äußert [20]. Grundvoraussetzung

für eine deutliche Druckfestigkeitssteigerung ist dabei, dass durch die Quarzmehlzugabe der W/B-Wert nicht wesentlich verändert wird. Dieser Effekt könnte aus dem geringen Wasseraugvermögen des Feinstquarzes resultieren [25].

Für die vorliegenden Versuche wurde Quarzmehl 1600 und Quarzmehl 16900 der Firma *Feichtinger* verwendet. Die Zahlen beziehen sich auf die Mahlfineinheit (Korngrößenverteilung in Mikron) des Quarzmehls. Die Korngrößenverteilung selbst wurde dem Produktdatenblatt der Firma *Feichtinger* entnommen [28].

2.2.2.3 Anmachwasser

Als Zugabewasser ist das in der Natur vorkommende Wasser geeignet, soweit es nicht Bestandteile enthält, die das Erhärten des Betons ungünstig beeinflussen oder den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen [29]. Restwasser, also jenes Wasser, das beim Auswaschen von Restbeton und -mörtel oder Gesteinskörnung, dem Reinigen von Mischertrommeln, Fahrmischern und Betonpumpen oder als Niederschlagswasser anfällt, darf für (ultra) hochfesten Beton nicht als Zugabewasser verwendet werden [18].

Die erforderliche Menge der Gesamtwasserzugabe bestimmt sich vorrangig aus dem Wasseranspruch der Gesteinskörnungen, während die Konsistenz des Frischbetons im Wesentlichen durch die Zugabe von verflüssigend wirkenden Betonzusatzmittel eingestellt wird. Das Gesamtwasser setzt sich aus der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnungen, dem Zugabewasser, sowie den Wasseranteilen der Zusatzmittel und Zusatzstoffe, wenn diese in wässriger Form verwendet werden, zusammen (Abbildung 2-13).

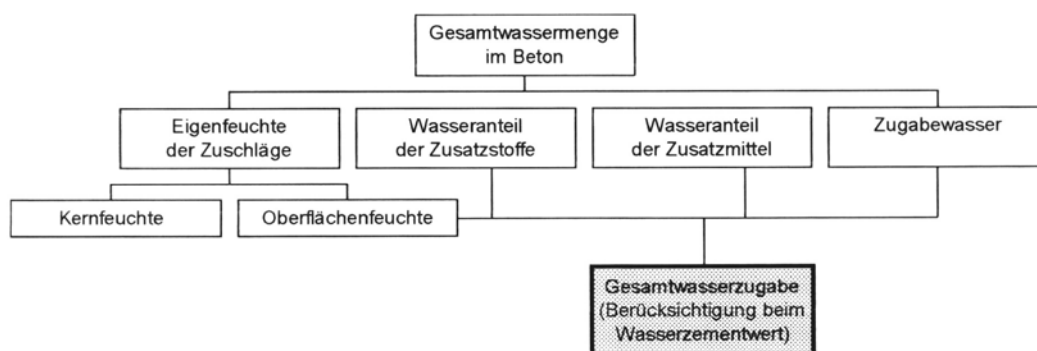


Abbildung 2-13: Gesamtwasserzugabe [30]

Für die Herstellung der Probekörper wurde Wasser aus dem öffentlichen Netz ohne weitere Untersuchung verwendet.

2.2.2.4 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe sind sehr feinkörnige Stoffe, die dem Beton zugegeben werden, um bestimmte Frisch- und Festbetoneigenschaften, wie z.B. die Verarbeitbarkeit, die Wasserundurchlässigkeit oder die Wärmenetwicklung, zu beeinflussen. Zusatzstoffe sind als Volumenbestandteile bei der Mischungsberechnung zu berücksichtigen [29].

Mit Hilfe des k-Wert Ansatzes dürfen Zusatzstoffe dem W/B-Wert und dem Zementgehalt folgendermaßen angerechnet werden:

$$W / B = \frac{Wasser}{(Zement + k \cdot Zusatzstoff)}$$

Formel 2-6: W/B-Wert [31]

Die Zusatzstoffe werden eingeteilt in:

- nahezu inaktive Zusatzstoffe (Typ I)
 - Gesteinsmehle nach ÖNORM EN 12620
 - Pigmente nach ÖNORM EN 12878
- puzzolanische oder latentlydraulische Zusatzstoffe (Typ II)
 - Flugasche nach ÖNORM EN 450
 - Silikastaub nach prEN 13263: 1998
 - aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ) nach ÖNORM B 3309.

Zur Herstellung von hochfestem Beton wird bevorzugt Silikastaub als Zusatzstoff verwendet. Die günstige festigkeitssteigernde Wirkung im Beton ist im Wesentlichen auf

- die Füllerwirkung,
- die puzzolanische Reaktion,
- den verbesserten Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung

zurückzuführen. Aus den soeben genannten Gründen wurde für die vorliegenden Versuche Mikrosilica verwendet [29] [31].

Mikrosilica

Mikrosilica, auch als Silikastaub bezeichnet, ist aus chemisch mineralogischer Sicht ein glasig erstarrtes, amorphes Siliciumoxid (SiO_2). In seinem primären Zustand liegt es pulverförmig vor. Es handelt sich dabei um den Filterstaub aus der Erzeugung von Aluminium, Silicium, Ferrosilicium und anderen Metallen.

Mikrosilica ist ein Abfallprodukt, das durch eine Reaktion des im Rauchgas enthaltenen Siliciumoxids mit Sauerstoff entsteht. Dadurch kondensiert es als amorphes Siliziumdioxid und wird in den Filtern ausgeschieden. Siehe dazu Abbildung 2-14.

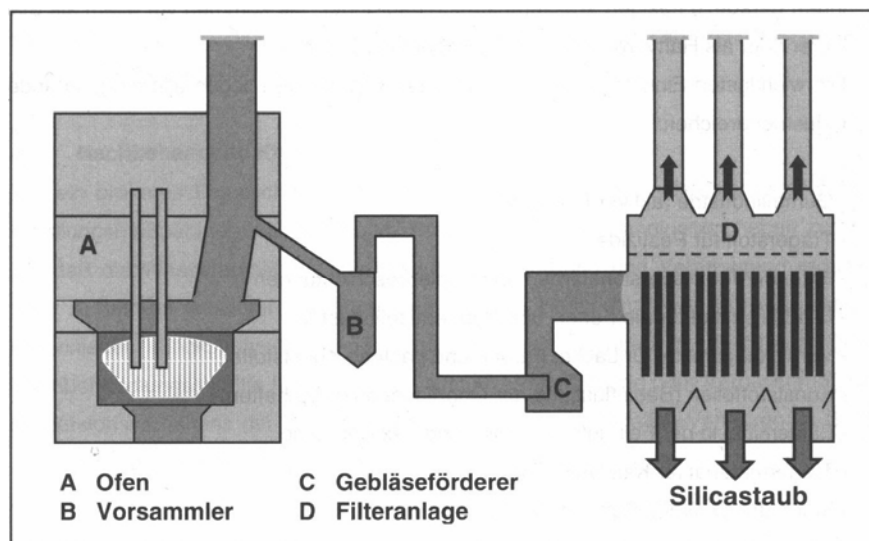


Abbildung 2-14: Schema der Gewinnung von Mikrosilica [44]

Aufgrund der extremen Partikelfinheit von Mikrosilica gestaltet sich die Bestimmung der Korngrößenverteilung äußerst schwierig. Die Partikelgröße und -verteilung von Silikastaub lässt sich am genauesten mittels der Rasterelektronenmikroskopie REM in einem zeitaufwendigen Auszählverfahren bestimmen [20].

Die durchschnittliche Teilchengröße beträgt 0,10 bis 0,15 μm , was eine spezifische Oberfläche von circa 10 bis 35 m^2/g ergibt. Mikrosilica besitzen also im Vergleich zu Zement eine 100-fach geringere mittlere Teilchengröße. Siehe dazu Abbildung 2-15. Die Dichte des Mikrosilica liegt bei etwa 2200 bis 2300 kg/m^3 [25] [44].

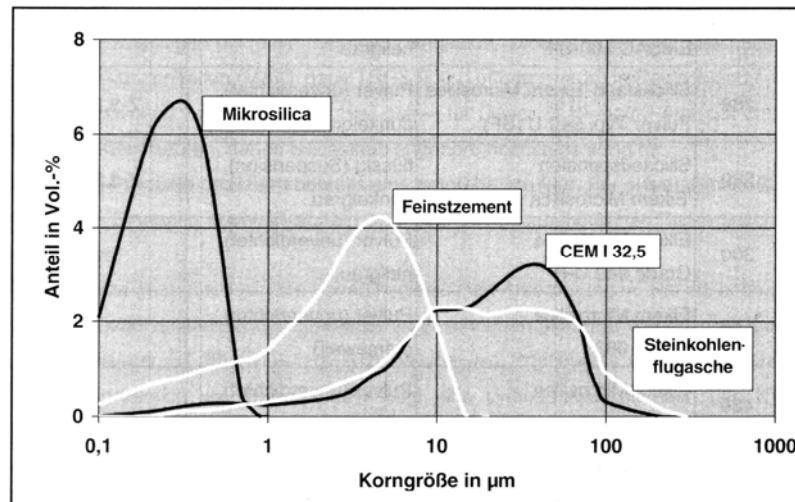


Abbildung 2-15: Korngrößenverteilungsfunktionen ausgewählter Stoffe [44]

Untersuchungen haben gezeigt, dass das Gesamtporenvolumen des Betons durch die Zugabe von Silikastaub nicht signifikant verändert wird (Abbildung 2-16). Es ist jedoch eine Verschiebung der Porengrößenverteilung zu Poren mit kleineren Porenradien zu beobachten [18].

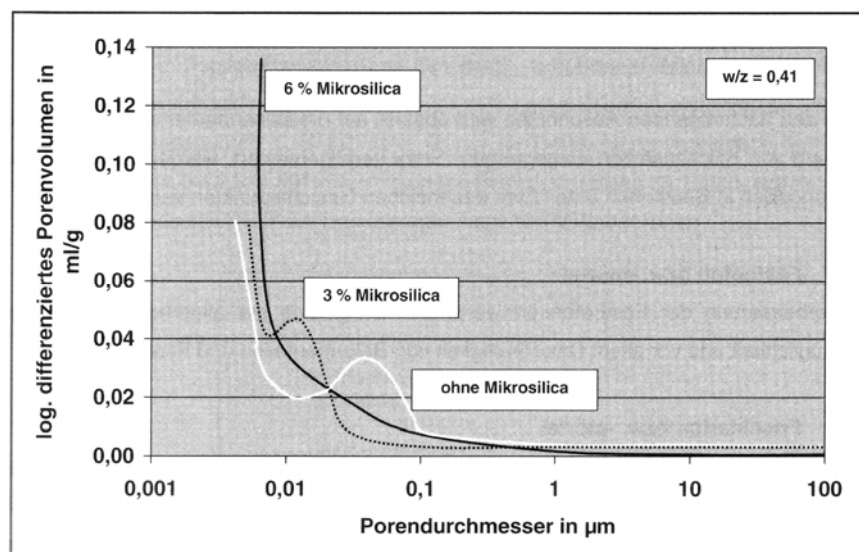


Abbildung 2-16: Veränderung der Porengrößenverteilung zufolge Mikrosilicazugabe [18]

Mikrosilica wirkt aufgrund der Feinheit als Füller zwischen den Zementkörnern, wodurch das Zementsteingefüge gleichmäßiger und deutlich dichter wird. Die Packungsdichte in der Zementsteinmatrix wird wesentlich vergrößert (Abbildung 2-17). Zusätzlich erhöht sich durch die verminderte Wasserdurchlässigkeit die Frost-

bzw. Frosttausalzbeständigkeit, und der Widerstand gegen chemische Angriffe wie von Sulfaten und Chloriden wird verbessert [4] [22].

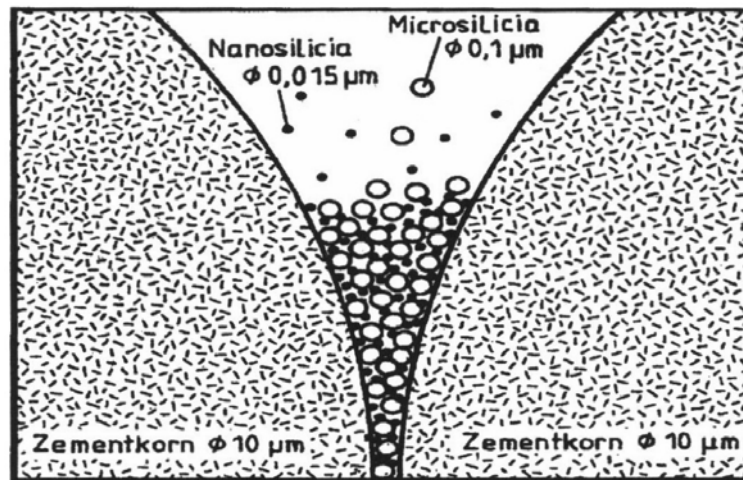
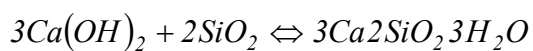


Abbildung 2-17: Füllereffekt von Mikrosilica und Nanosilica [18]

Die höhere Festigkeit durch das Mikrosilica beruht auf seiner puzzolanischen Wirkung. Das bei der Hydratation von Portlandzementklinker entstandene Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagiert mit dem Silikastaub SiO_2 und es bildet sich Calciumsilikathydrat CSH.



Formel 2-7: puzzolanische Reaktion von Silicazusatzstoffen [24]

Zusätzliches Calciumsilikathydrat erhöht die Betonfestigkeit, nicht aber die Festigkeit des Zementsteins. Dies hängt mit dem Abbau der Calciumhydroxidmenge und der entsprechenden Verbesserung des Verbundverhaltens zwischen dem Zuschlag und dem Zementstein zusammen [24].

Mikrosilica wird sowohl als Pulver in loser und kompakter Form, als auch als Suspension angeboten. Das wichtigste Qualitätsmerkmal für Mikrosilica ist das Ausbleiben von Agglomerationen. Deshalb müssen für hochfeste Betone unverdichtete Silikastäube verwendet werden. Suspensionen können nicht eingesetzt werden, da ihr Wassergehalt den angestrebten Gesamtwassergehalt der Mischung überschreiten kann. Ein typischer Silikastaubgehalt für ultrahochfeste Betone liegt bei ca. 25 bis 30 % bezogen auf den Zementgehalt.

Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit ist zu beachten, dass bei der Herstellung von Hochleistungsbetonen mit Mikrosilica hochaktive Fließmittel benötigt werden [25] [32].

Für die Herstellung der Betonmischung wurde pulverförmiges und unverdichtetes Mikrosilica der Firma *Elkem Materials* des Typs 940 U verwendet. Die chemisch physikalischen Kenndaten befinden sich in Tabelle 2-3.

Tabelle 2-3: Chemisch-physikalische Kenndaten von *Elkem* Mikrosilica Typ 940 [33]

SiO ₂ – amorphes Siliziumdioxid [% Trockenmasse]	>90
H ₂ O – Eigenfeuchte, verpackt [%]	<1,0
Glühverlust LOI [% Trockenmasse]	<3,0
Siebrückstand auf 45 µm Sieb [%]	<1,5
Schüttdichte [kg/m ³]	200 - 350

2.2.2.5 Zusatzmittel

Zusatzmittel sind pulverförmige oder flüssige Zusätze, die durch chemische und/oder physikalische Wirkung die Frisch- oder Festbetoneigenschaften beeinflussen, z.B. die Verarbeitbarkeit, den Frost- bzw. Frosttausalz widerstand, Erstarrungszeiten oder die Wasseraufnahme [29].

Betonzusatzmittel werden in folgende Wirkungsgruppen eingeteilt [21] [34]:

- Betonverflüssiger (BV): verbessern die Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei gleichem Wassergehalt oder erhöhen die Güte des Betons bei Verminderung der Wasserzugabe.
- Fließmittel (FM): wirken stark verflüssigend und bewirken eine erhebliche Verminderung des Wasseranspruches und/oder eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit.
- Luftporenbildner (LP): erzeugen Luftporen, um Druck abzubauen.
- Dichtungsmittel (DM): vermindern die kapillare Wasseraufnahme.
- Verzögerer (VZ): bewirken eine Verzögerung beim Erstarren des Zementleims und damit eine längere Verarbeitbarkeit von Beton.
- Beschleuniger (BE): bewirken eine Beschleunigung des Erstarrens bzw. Erhärtens und damit eine schnellere Wärmeentwicklung.

- Einpresshilfen (EH): wirken dem Absetzen des Zementmörtels entgegen.
- Stabilisierer (ST): erhöhen das Zusammenhaltevermögen des Frischbetons, verbessern die Verarbeitbarkeit und vermindern das Wasserabsondern (Bluten).
- Chromatreduzierer (CR): dienen der Reduktion des löslichen Chroms im Zement.
- Recyclinghilfen (RH): ermöglichen eine Wiederverwendung des Waschwassers, das beim Reinigen von Mischfahrzeugen anfällt.
- Schaumbildner (SB): dienen zur Herstellung eines Schaumbetons durch Einführung eines hohen Gehaltes an Luftporen.

Fließmittel

Ultrahochfester Beton enthält zwischen 350 bis 400 l/m³ Mehlkorn $\leq 0,125$ mm. Deswegen und wegen des geringen Wassergehaltes ($W/B\text{-Wert} \leq 0,25$) sind wirksame Fließmittel erforderlich, um eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten [26].

Die Festbetonqualität in Bezug auf die Festigkeit, Dichtigkeit, Schwindverhalten etc. nimmt mit einem abnehmenden $W/B\text{-Wert}$ zu, der Frischbeton wird bei einer geringeren Wassermenge jedoch immer steifer und lässt sich dadurch schwerer verarbeiten. Verflüssiger wirken dem Versteifen entgegen und verbessern damit die Konsistenz bei selbem $W/B\text{-Wert}$ oder erlauben es, die beigegebene Wassermenge bei gleich bleibender Konsistenz zu verringern. Siehe dazu Abbildung 2-18.

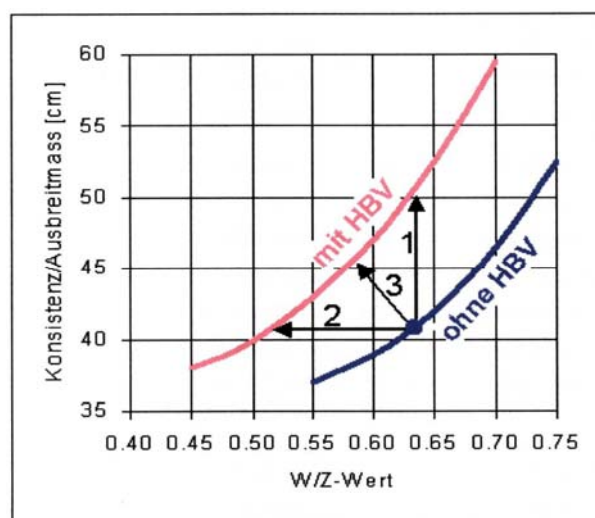


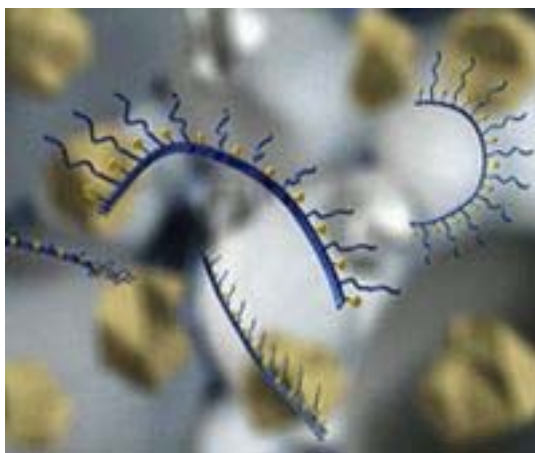
Abbildung 2-18: Anwendungsmöglichkeiten für Fließmittel [18]

Diese geringen W/B-Werte sind nur durch den Einsatz großer Mengen Fließmittel realisierbar. Dabei muss die Verträglichkeit von Fließmittel, Zuschlag und Bindemittel gewährleistet sein. Es werden Fließmittel auf Polyacrylatbasis und Polycarboxylatetherbasis bevorzugt. Diese haben laut [25] die beste Wirksamkeit. Fließmittel auf Naphtalinsulfonat- oder Melaminharzbasis kommen dagegen selten zur Anwendung [25].

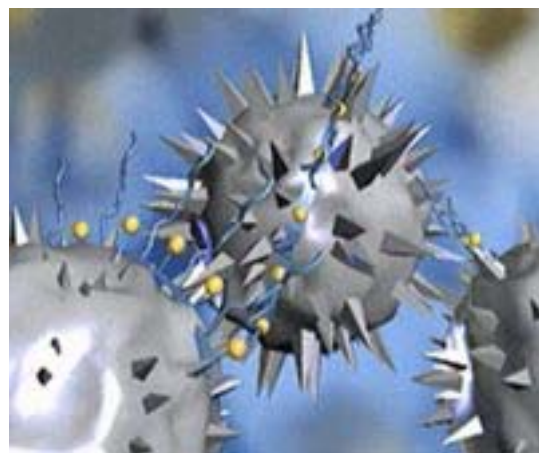
Die Wirkungsweise des hier verwendeten LZF-Fließmittels beruht auf folgenden Systemen [4] [23]:

- Herabsetzung der Oberflächenspannung des Zugabewassers,
- Abstoßeffekt durch gleichsinnige Aufladung der Zementteilchen,
- Reibungsverringern zwischen den Zementteilchen,
- Verzögerung der oberflächlichen Hydratation der Zementpartikel, wodurch mehr Wasser für die Verflüssigung zur Verfügung steht.

Das LZF-Fließmittel-Molekül lagert sich an der Oberfläche der Zementkörner an und lädt diese elektrostatisch auf, wodurch sie sich gegenseitig abstoßen und sich ungehindert bewegen können (=Dispergiereffekt). Die langen Seitenketten stellen eine zusätzliche räumliche Barriere dar (=sterischer Effekt, vgl. dazu Abbildung 2-19 a). Durch ihre Aufladung verhindern sie bei einsetzender Hydratation ein Verbinden der Zementkörner, wodurch der Frischbeton länger verarbeitbar bleibt (Abbildung 2-19 b). Erst bei weiterem Anwachsen der Zementkörner wird diese Wirkung aufgehoben [20] [24].



(a)



(b)

Abbildung 2-19: Wirkungsweise von Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis [24]

Das verwendete Fließmittel *Duriment LZF* ist ein universell einsetzbares Fließmittel auf Basis Polycarboxylatether [35].

Betone mit *Duriment LZF* neigen nicht zu Entmischungen und die Hydratation wird nicht negativ beeinflusst. Durch Ladungsverteilungen und sterische Behinderung wird die Beweglichkeit des Zementleims stark verbessert und verlängert somit die Verarbeitungszeit wesentlich. Der Wasseranspruch für gleiche Konsistenz wird verringert und die Verarbeitbarkeit erhöht [35].

Grundsätzlich stabilisieren alle Tenside wässrige Schäume und erhöhen damit den Lufteintrag im Beton. Aus chemischer Sicht können Melamin- und Naphtalinsulfonate, aber auch Polycorboxylatether zu den Tensiden gezählt werden. Aufgrund der Neigung zur Schaumbildung wurde zur Herstellung des Betons ein Entschäumer verwendet [36].

Entschäumer

Entschäumer verhindern einen unkontrollierten Lufteintrag in den Frischbeton während des Mischvorgangs. Somit werden negative Auswirkungen auf die Festigkeit des Betons vermieden. Der chemische Aufbau sowie die Wirkungsweise von Entschäumer sind noch nicht ausreichend erforscht.

Für die vorliegenden Versuche wurde ein Entschäumer T der Marke *Duriment* verwendet. Der Entschäumer wurde mit 0,1 % Anteil bezogen auf das Fließmittel diesem beigemengt.

2.2.3 W/B-Wert

Der Wasserzementwert (ω) ist das Verhältnis von Wassergewicht (W) zu Zementgewicht (Z):

$$\omega = W / Z$$

Formel 2-8: Wasserzementwert [29]

Bei der Erhärtung des Zements werden die Zementkörner von Wasserhüllen umgeben, die die Oberfläche anlösen und zur Bildung der Hydratphasen des Zementsteins führen (Abbildung 2-20).

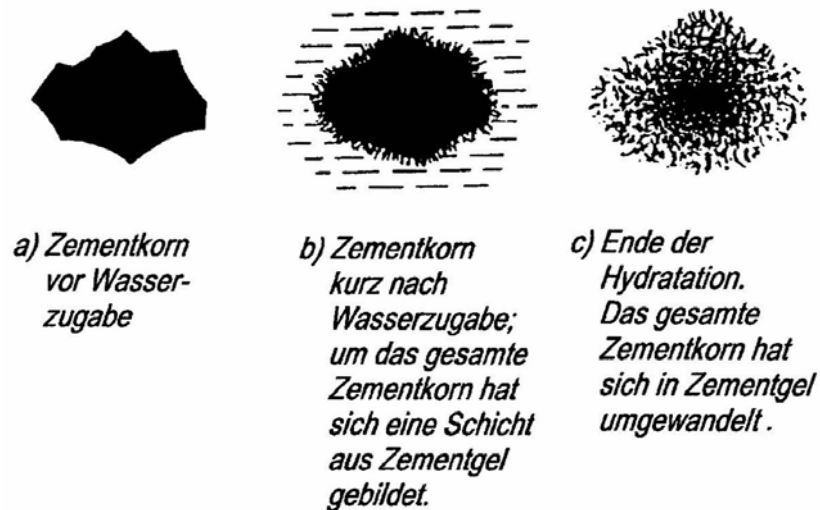


Abbildung 2-20: Schematische Darstellung der Hydratation eines Zementkorns [19]

Da bei der Erhärtung des Zements nur etwa 25 % seines Gewichts chemisch an Wasser und 15 % in den Gelporen gebunden werden, ist der Zementstein in seiner Festigkeit und Dichtigkeit umso hochwertiger, je weniger er von überschüssigem Wasser, das beim Austrocknen Gelporen und Kapillaren hinterlässt, durchsetzt ist. Aus diesem Grund liegt der optimale W/Z-Wert theoretisch bei 0,25 und praktisch bei circa 0,4. Um höhere Festigkeiten zu erreichen, muss der W/Z-Wert herabgesetzt werden. Für die Herstellung von ultrahochfestem Beton, ist ein W/Z-Wert von $\leq 0,2$ erforderlich. Bei diesen kleinen W/Z-Werten hydratisieren die großen Zementpartikel nur oberflächlich. Die nicht hydratisierten Kerne liegen somit als fester und dichter „Zuschlag“ im Gefüge eingebettet vor. Zusätzlich müssen im Bereich $\omega < 0,4$ Verflüssiger bzw. Fließmittel eingesetzt werden, damit der Zement nicht verklumpt und ein plastischer Zementleim entsteht [19] [25] [29].

Mit dem In-Kraft-Treten der ÖNORM B 4710-1 wurde der Begriff W/Z-Wert durch den Begriff W/B-Wert abgelöst. Unter W/B-Wert versteht man das Verhältnis von Wasser zu allen in der Betonrezeptur verwendeten hydraulisch wirkenden Bindemitteln und Zusatzstoffen (Typ II). Näheres zur Anrechenbarkeit der Zusatzmittel und zum k-Wert Ansatz siehe Kapitel 2.2.2.4.

Es gilt wie beim W/Z-Wert, dass je geringer der W/B-Wert ist, desto höher sind die Festigkeiten. Beim Normalbeton liegt dieser Wert um 0,45. Für UHPC Anwendungen werden Betone mit einem W/B-Wert von bis zu 0,14 verwendet. Der kleinste, mit der

dichtesten Mischung jemals erhaltene W/B-Wert bei Mischungsentwürfen für einen UHPC ist 0,08 [20].

2.2.4 Herstellung von UHPC

Die Herstellung eines ultrahochfesten Betons basiert auf dem Grundgedanken, Gefügestörungen zu minimieren. Das heißt, dass Poren und Mikrorisse durch die Wahl der Ausgangsstoffe, sowie durch eine entsprechende Verarbeitung und Nachbehandlung reduziert werden.

Die Ausgangsstoffe (siehe Kapitel 2.2.2) müssen dazu entsprechend sorgfältig ausgewählt und aufeinander abgestimmt werden. Das Betongefüge wird einerseits durch die Abstimmung der Partikelgröße von Zuschlag und Bindemittel, sowie durch den Mischvorgang homogenisiert. Die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons wird nicht nur von der Wahl der Ausgangsstoffe und dem Herstellungsprozess, sondern auch von der Nachbehandlung beeinflusst [37].

2.2.4.1 Stoffraumrechnung

Die Stoffraumrechnung (Festraumrechnung) beruht auf der Vorstellung, dass die Bestandteile des Betons stofflich getrennt in festen Massen bzw. in Volumen den Raum von 1 m³ ausfüllen (Abbildung 2-21).

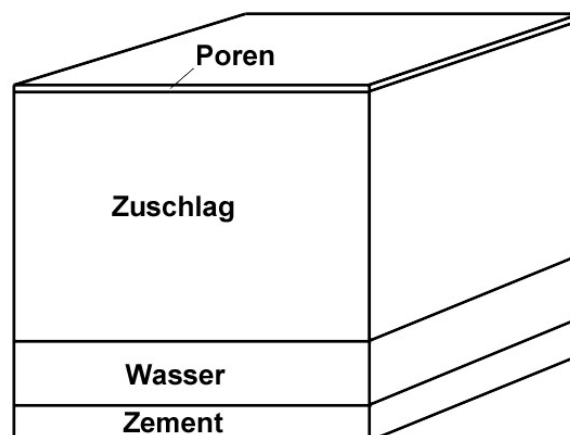


Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der Stoffraumanteile in 1 m³

Die Ausgangsparameter, die in Anlehnung an das Rezept von *Michael Lins* [18] gewählt wurden, sind:

- 700 kg Zement,
- 180 l Wasser,
- 140 kg Mikrosilica,
- 4,5 % Fließmittel bezogen auf den Zementanteil, Erfahrungswert aus den Probemischungen,
- 0,1 % Entschäumer bezogen auf den Fließmittelgehalt, laut Herstellerangabe,
- 4 % Luftporenanteil, Erfahrungswert aus den Probemischungen,
- k-Wert-Ansatz für Silikastaub laut ÖNORM B 4710-1: $k = 2$ mit folgender Bedingung: $\text{Silikastaub} / \text{Zement} \leq 0,11$, das ist die Höchstmenge Silikastaub, die auf den Wasserzementwert und den Zementgehalt angerechnet werden darf.

Aus dem letzten Punkt ergeben sich ein Bindemittelgehalt von 854 kg und ein W/B-Wert von 0,21.

Aufgrund der gewählten Mengen und der Tatsache, dass der gesamte Stoffraum 1m^3 betragen soll, ergibt sich die Menge des Zuschlages. Diese wird aufgeteilt in die einzelnen Korngrößen, wobei von jeweils 35 kg feinstem und größtem Quarzmehl ausgegangen wird. Von der Restmenge an Quarzsand wird der Wassergehalt bestimmt und vom Gesamtwassergehalt abgezogen. Der letzte Schritt ist das Umrechnen der Mengen der Ausgangsstoffe auf das erforderliche Mischvolumen.

2.2.4.2 Mischen

Für das Mischen von ultrahochfesten Betonen werden verschiedene Technologien angewendet. Infolge der geringen W/B-Werte, der eventuell hohen Fasergehalte und der geforderten Homogenität der Mischung werden hohe Anforderungen an die Mischtechnologie gestellt. Je nach Kombination der Ausgangsstoffe kann ein übermäßiges Mischen des UHPC zu einem schnellen Ansteifen des Frischbetons oder aber dagegen zu einer starken Verflüssigung führen. Im Vergleich zu Normalbeton weisen hochfeste Betone unter sonst gleichen Mischbedingungen aufgrund des intensiven Mischens höhere Frischbetontemperaturen auf, die gegebenenfalls zu beachten sind.

Entscheidend für die Eigenschaften des Frischbetons sind auch die Mischreihenfolge und die zugehörigen Mischdauern. Bedingt durch die Zusammensetzung der

ultrahochfesten Betone sind die Viskosität und die Klebrigkeit des Frischbetons sehr ausgeprägt. Dieses spezifische Frischbetonverhalten führt zu einer deutlich erhöhten Mischintensität und damit zu sehr langen Mischzeiten. In [20] wird vorgeschlagen, in Vorversuchen den optimalen Mischvorgang für die gegebene Rezeptur zu finden. Die Auswirkung unterschiedlich langer Mischzeiten wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Üblicherweise werden zuerst alle trockenen Bestandteile des UHPC in die Mischtrommel gegeben. Nach einer entsprechenden Trockenmischzeit zum Vermischen der Bestandteile kommen alle flüssigen Ausgangsstoffe hinzu. Werden dem ultrahochfesten Beton Fasern zugegeben, so werden diese erst dann beigemischt, wenn die Wirkung des Fließmittels bereits eingesetzt hat [20] [38].

Die normativen Grundlagen sowie eine ausführliche Beschreibung der Mischprozesse, der Mischgüte und der Mischertypen befinden sich in Kapitel 2.1.

2.2.4.3 Verdichten

Zur Verdichtung können je nach Bauteilgröße Außen- oder Oberflächenrüttler verwendet werden. Die Verdichtung ist sorgfältig durchzuführen, da UHPC ein möglichst dichtes Gefüge aufweisen muss, um die erwünschten hohen Festigkeiten zu erreichen. Mischungen mit Silikastaub benötigen eine höhere Verdichtungsenergie, um einen möglichst geringen Luftporengehalt zu erreichen.

Selbst bei lang anhaltendem intensiven Rütteln ist aufgrund der Klebrigkeit von UHPC keine Segregation der Zuschläge zu befürchten. Weiters kann unter Druck verdichtet werden, wodurch ein Ausschluss der Luft sichergestellt werden kann [20] [25].

2.2.4.4 Nachbehandlung

Die Qualität des ultrahochfesten Betons wird wesentlich von der angewandten Nachbehandlungsmethode bestimmt. Freie Oberflächen müssen sorgfältig nachbehandelt werden, um einer möglichen Rissbildung durch Austrocknen entgegen zu wirken. Wenn die freien Oberflächen nicht sofort nach dem Verdichten des Betons z. B. mit Folien abgedeckt werden, sind schon relativ früh erste Risse zu beobachten. Dies gilt insbesondere dann, wenn bei höheren Temperaturen und Windeinwirkung betoniert wird [38] [39].

In [37] wird davon gesprochen, dass durch eine Druckbeaufschlagung während der Erhärtungsphase des Betons eine Festigkeitssteigerung erzielt werden kann. Es konnten Druckfestigkeiten von bis zu 650 N/mm² erreicht werden, indem Beton bei hohen Temperaturen und erhöhtem Druck nachbehandelt wurde.

Bei den vorliegenden Versuchen wurden die Probekörper weder mit Druck noch mit hohen Temperaturen nachbehandelt, da es nicht Ziel dieser Arbeit war, möglichst hohe Festigkeiten zu erreichen.

2.2.5 Erhärten von Hochleistungsbetonen

Die Betonfestigkeit nimmt mit dem Alter zu. Schon nach 7 Tagen erreicht der Beton circa 75 % seiner 28-Tages-Festigkeit. Die Endfestigkeit wird unter Umständen erst nach Jahren erreicht, der wesentliche Anteil jedoch bis zum 28. Tag.

Wie andere chemische Vorgänge wird auch die Erhärtung des Betons durch niedrigere Temperaturen verzögert und durch höhere Temperaturen beschleunigt. Der Erhärtungsfortschritt ist abhängig von der Art des Bindemittels und dessen Wärmeentwicklung bei der Erstarrung, von der Höhe des Wasserzusatzes und der Dicke der Betonquerschnitte [40] [41].

Um Erhärtungsverläufe darstellen und auch vergleichen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Probekörper einer Mischung am ersten, am 7. und auch am 28. Tag geprüft.

2.2.6 Festbetoneigenschaften

2.2.6.1 Homogenität

Konventionelle Betone haben ein heterogenes Gefüge. Ursachen hierfür sind z. B. die unterschiedlichen E-Moduln oder die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Zuschlag und Zementsteinmatrix. Diese Eigenschaften sind bei ultrahochfesten Betonen wesentlich reduziert. Gründe hierfür sind:

- Geometrische Sicht: Grobe Zuschläge fehlen und werden durch feine Sande ersetzt, deren Größtkorn mit 1 mm Durchmesser begrenzt wird (siehe Kapitel 2.2.2.2),
- Mechanische Sicht: Das Verhältnis der E-Moduln von Zuschlag und hydratisiertem Zementleim wird verkleinert zu ungefähr 1,

- Physikalische Sicht: Die Temperaturkoeffizienten von Zementstein (bei kleinem W/B-Wert) und Zuschlag (Quarz) sind etwa gleich groß.

Weiters wird die Bildung einer Schwächezone zwischen Zuschlagskorn und Zementstein aufgrund der Zugabe von Mikrosilica vermieden (siehe Kapitel 2.2.2.1). Zudem steht der Verringerung der Zuschlagsmenge eine Erhöhung der Zement- und Mikrosilicamenge gegenüber [18] [20] [25].

Aufgrund der genannten Merkmale kann UHPC als ein nahezu homogener Baustoff bezeichnet werden. In wie fern der Mischvorgang Auswirkungen auf die Homogenität des UHPC hat, wird in dieser Arbeit gezeigt.

2.2.6.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton ist von sehr vielen Faktoren abhängig. Bei Verwendung der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Ausgangsstoffe, einer sorgfältigen Verarbeitung und einer optimalen Nachbehandlung sind Druckfestigkeiten von circa 200 N/mm² und höher möglich. Aufgrund dieser hohen Werte ist die Betonprüfung von UHPC an 150 x 150 mm Würfeln, wie in ÖNORM B 3303 vorgeschrieben, an den vorhandenen Prüfeinrichtungen nicht möglich. Es müssen Würfel mit 100 mm Seitenlänge hergestellt werden, was aufgrund der vorliegenden Homogenität des Materials ohne weiters vertretbar ist und im Rahmen der Versuche auch gemacht wurde [18] [20].

Die Bruchform des Probekörpers wird von der Prüfmethode bestimmt. Durch die Reibung zwischen den gedrückten Flächen des Würfels und den geschliffenen Maschinendruckplatten ist die Querdehnung in diesem Bereich vollständig behindert. Im Mittelbereich kann sich diese dagegen frei entwickeln. Aufgrund dieser Gegebenheiten ergibt sich ein wie in Abbildung 2-22 dargestelltes Bruchbild.

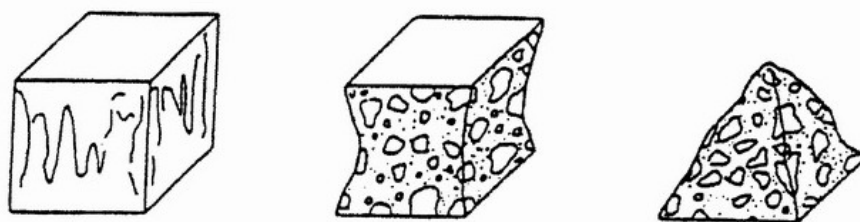


Abbildung 2-22: Bruchfigur nach Druckversuch nach ÖNORM EN 12390-3 [42]

Alle vier freiliegenden Flächen weisen einen etwa übereinstimmenden Rissbefall auf. Die Flächen, die sich in Kontakt mit den Druckplatten befanden, wurden kaum geschädigt. Dieses Bruchbild wird durch die durchgeführten Versuche bestätigt [42].

2.2.6.3 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit ist von den Eigenschaften des Zementsteins, den Eigenschaften des Zuschlags und der Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag abhängig. Die Biegezugfestigkeit wird weiters, falls erwünscht, entscheidend durch eine Faserbeigabe erhöht. Wie sich die verschiedenen Fasertypen auf die Eigenschaften des UHPC auswirken muss noch genauer untersucht werden. Stahlfasern bewirken zwar höhere Festigkeiten, Kunststofffasern weisen allerdings im Brandfall günstigere Eigenschaften auf.

Grundsätzlich ist zu beobachten, dass bei allen UHPC Mischungen die maximal erreichbare Biegespannung ungefähr doppelt so groß ist wie jene, die beim Auftreten der ersten Risse erreicht wird. Durch die Zugabe von Stahlfasern sind Biegezugfestigkeiten über 30 N/mm² problemlos erreichbar [20] [42] [43].

2.2.6.4 Porosität

Ziel der Entwicklung von ultrahochfesten Betonen ist es, eine möglichst dichte Packung zu erreichen, das heißt, es ist eine sehr kleine Porosität anzustreben. Untersuchungen der Porenverteilung, wie sich auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemacht wurden, können mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie durchgeführt werden [25]. Der erfassbare Porenbereich liegt bei $0,002 \mu\text{m} \leq v \leq 100 \mu\text{m}$ [53].

Die Gesamtporosität setzt sich aus Luftporen, Kapillarporen und Gelporen zusammen (Abbildung 2-23) [38].

Gelporen sind Poren im Bereich von 0,001 bis 0,01 μm und entstehen mit der Bildung des Zementgels und sind Bestandteil desselben. Gelporen sind unter Normalbedingungen stets mit Porenlösung gefüllt und praktisch undurchlässig für Gase.

Kapillarporen sind Poren in der Größenordnung von 0,01 bis 0,1 μm . Sie entstehen durch das überschüssige Wasser im Zementstein, welches nicht an der Hydratation teilgenommen hat und auch nicht physikalisch in den Gelporen gebunden ist.

Luftporen oder Verdichtungsporen sind $> 1 \text{ mm}$ und entstehen durch unvollständiges Verdichten des Frischbetons [44].

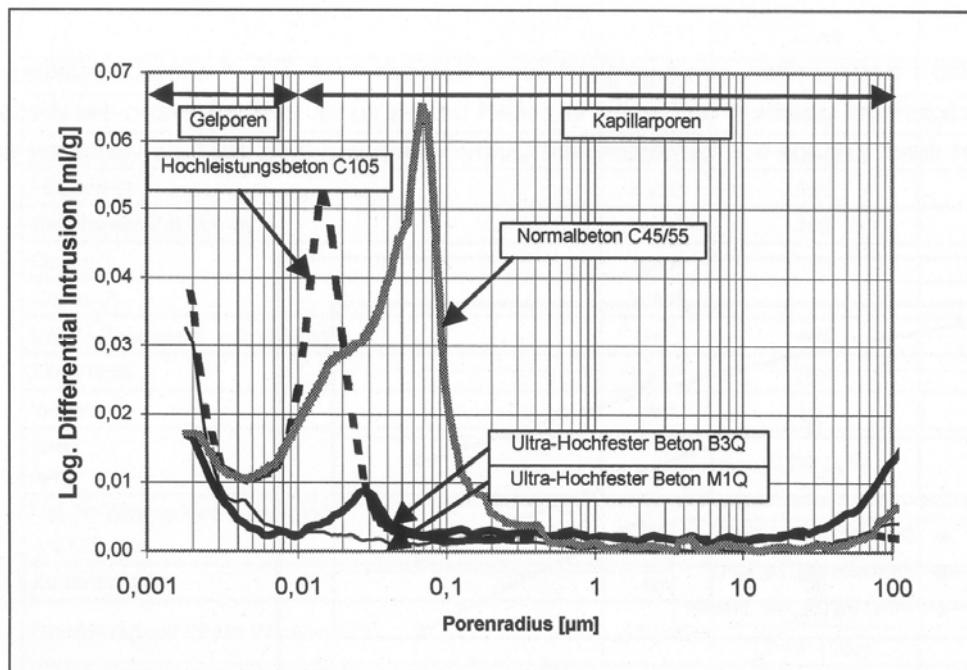


Abbildung 2-23: Vergleich der Porenradienverteilung verschiedener Betone [38]

Durch den sehr niedrigen W/B-Wert des UHPC und die dichte Feststoffpackung in der Matrix sinkt die Gesamtporosität von praktisch vollständig verdichtetem ultrahochfesten Beton auf nur noch rund 4 bis 6 Vol.-%. Abbildung 2-23 zeigt die im Quecksilberdruckporosimeter gemessene Porenradienverteilung des bereits hochwertigen Zementsteins eines Betons der Festigkeitsklasse C105 im Vergleich zu denjenigen zweier ultrahochfester Feinbetone. Die Gesamtporosität des Normalbetons liegt bei 15 Vol.-%, die von C105 bei rund 11 Vol.-% und die der beiden ultrahochfesten Betone bei jeweils etwa 6 Vol.-% [26] [38].

Die für die Stofftransporte verantwortlichen Kapillarporen fehlen beim UHPC praktisch ganz. Dies ist der eigentliche Grund dafür, dass sachgerecht hergestellter UHPC einen besonders hohen Widerstand gegen Carbonatisierung, gegen das Eindringen von Chloridionen und gegen Frost- und Frosttausalz Angriff aufweist [38].

J. Horvath führte Strukturuntersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie an ultrahochfestem Beton bei unterschiedlich hohen Temperaturen durch (Abbildung

2-24). Er stellt fest, dass thermisch unbeanspruchter UHPC wesentlich dichter ist als gewöhnlicher portlandzementgebundener Mörtel. UHPC weist nur rund ein Viertel der Porosität des Mörtels auf. In beiden Materialien laufen jedoch im Zuge der Erwärmung in den entsprechenden Temperaturbereichen etwa die gleichen Entwässerungs-, Umwandlungs-, Zersetzungs- und Sinterreaktionen ab. Diese führen in beiden Systemen mit ansteigender Temperatur zu etwa gleich großen Erhöhungen der Porosität [45].

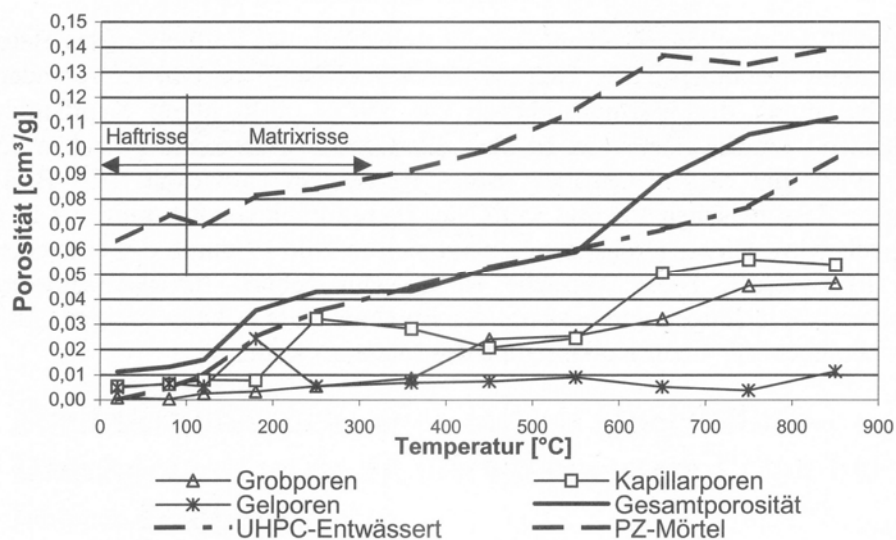


Abbildung 2-24: Zusammenstellung der Porositäten in Abhängigkeit von der Temperatur [45]

2.2.7 Anwendungsgebiete

Seit Anfang der 80er Jahre ist Hochleistungsbeton beinahe weltweit im Einsatz. In Österreich wird Hochleistungsbeton seit ca. 15 Jahren hergestellt und verwendet.

Mögliche Einsatzgebiete des ultrahochfesten Betons sind filigrane, weit gespannte vorgefertigte Bauteile mit aufgelösten Querschnitten, die bevorzugt druckbeansprucht sind, gegebenenfalls kombiniert mit intelligenter Vorspannung, Bauteile anstelle von Stahlkonstruktionen bei aggressiven Umweltbedingungen, Bauelemente für hoch beanspruchte Bereiche von Tragwerken, Rohre, und andere.

Der erste großtechnische Einsatz eines UHPC erfolgte 1966 in Kanada beim Bau der Fuß- und Radwegbrücke Sherbrooke (Abbildung 2-25).



Abbildung 2-25: Sherbrooke Footbridge, Canada [47]

Die Hauptentwicklung vollzog sich jedoch in den darauf folgenden Jahren vorrangig in Frankreich. Hier wurde UHPC z. B. für die Unterbauten und Rieseleinbauten des Kühlturms des Kraftwerks Cattenom verwendet. In den USA steht in erster Linie die Herstellung von Abwasserrohren, Druckrohrleitungen und Masten aus UHPC im Vordergrund der Entwicklung. In Deutschland und Österreich begann das wissenschaftliche Interesse an ultrahochfesten Betonen vergleichsweise spät. Die erste baupraktische Anwendung von Hochleistungsbeton war 2000 mit dem Bau der Moosbrücke in Kärnten. Es handelt sich dabei um ein Einfeldbrückenobjekt mit einer Stützweite von 6,50 m [39] [46].

Um einen maximalen Profit aus den Festigkeitseigenschaften des UHPC zu schlagen, hat man neue Querschnittsformen entwickelt. Der „X-shaped“ Querschnitt wurde so gestaltet, dass er dieselbe Momentenbeanspruchung wie sein Widerpart aus Stahl mit gleicher Höhe und ähnlichem Gewicht aufnehmen kann. Verglichen mit Normalbetonbauteilen kann die Eigenlast des UHPC-Bauteils mit neuen Querschnittsformen um den Faktor 3 gesenkt werden. Die Form und Abmessungen eines „X-shaped“ Querschnittes sind in Abbildung 2-26 dargestellt.

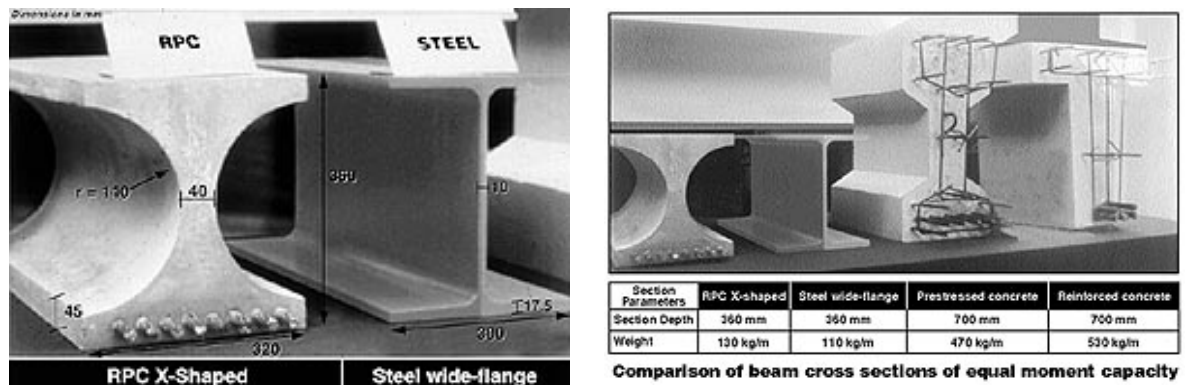


Abbildung 2-26: Vergleich verschiedener Querschnitte aus verschiedenen Materialien [48]

Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind Verbundstützen, also Stahlrohrstützen mit UHPC-Füllung, Beschichtungen, da UHPC einen hohen Widerstand gegenüber aggressiven Medien bietet, Schutzschilde für militärische Anlagen und viele mehr [25].

Durch die Verwendung von ultrahochfesten Betonen können für die Betonbauweise in bestimmten Teilbereichen neue Anwendungen, die momentan noch anderen Werkstoffen vorbehalten sind, erschlossen werden. Insbesondere mit dem Hintergrund der zunehmenden Anforderungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit, die an die Werkstoffe zukünftig gestellt werden, wird UHPC für die Baupraxis interessant.

3 Versuchsplanung und Vorversuche

3.1 Vorbemerkungen

Der experimentelle Teil dieser Arbeit besteht aus Versuchen an Frisch- sowie Festbeton, die im institutseigenen Labor durchgeführt wurden.

Das Ziel der Versuche ist herauszufinden, mit welchem Mischwerkzeug und bei welcher Mischgeschwindigkeit und -dauer eine optimale Homogenität des UHPC erreicht werden kann. Dabei werden, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, nur die Geschwindigkeit des Wirblers und die Zeit der Homogenisierung der Feinstoffe variiert. Die Topfgeschwindigkeit sowie die Nachmischzeit bleiben immer gleich. Weiters werden dieselben Geschwindigkeits-Zeit-Kombinationen sowohl mit einem Sternwirbler, als auch mit einem Stiftenwirbler durchgeführt. Die erreichbare Homogenität wird durch den Vergleich der Frischbetoneigenschaften (Ausbreitmaß und Luftporengehalt, siehe Abschnitt 4.3), sowie durch die Gegenüberstellung der erlangbaren Festigkeiten (Druck- und Biegezugfestigkeit, siehe Abschnitt 4.4) und den Porengehalt (Abschnitt 4.4.4), gemessen mit dem Quecksilberporosimeter, charakterisiert.

3.2 Mischungsaufbau

3.2.1 Sieblinie

Die Sieblinie von Quarzsand mit der Körnung 0,06/1 wurde am Siebturm im Labor bestimmt. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, wurde vorerst der Wassergehalt des Sandes bestimmt. Drei unterschiedliche Mengen wurden in der Mikrowelle jeweils 15 min getrocknet und davor und danach gewogen. Aus der Differenz der Masse errechnet sich der Wassergehalt wie folgt:

$$w = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100[\%]$$

Formel 3-1: Wassergehalt [10]

Die Mittelung der Ergebnisse ergab einen mittleren Wassergehalt von 6,40 %. Dieser Wert geht auch in die Stoffraumrechnung ein, da die Feuchte des Sandes zu berücksichtigen ist, und somit die Menge an Anmachwasser reduziert wird.

Um die Sieblinie zu bestimmen wurde zweimal eine Menge von rund zwei kg im Siebturm gesiebt, abgewogen und ausgewertet. Die Sieblinienberechnung sowie das entsprechende Diagramm befinden sich in Tabelle 3-1 bzw. Abbildung 3-1.

Tabelle 3-1: Sieblinienberechnung Quarzsand

Trockensiebung Quarzsand 0,06/1

Körnung	E (f) [gr]	Sieb	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
0,06/1	1950	R [gr]	1950	1900	1850	1500	300	17	0
Feuchte	A (tr) [gr]	R [%]	100,0	97,4	94,9	76,9	15,4	0,9	0,0
0,0%	1950	D [%]	0	2,6	5,1	23,1	84,6	99,1	100,0

Körnung	E (f) [gr]	Sieb	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
0,06/1	1800	R [gr]	1800	1776	1700	1400	300	12	0
Feuchte	A (tr) [gr]	R [%]	100,0	98,7	94,4	77,8	16,7	0,7	0,0
0,0%	1800	D [%]	0	1,3	5,6	22,2	83,3	99,3	100,0

Körnung	% - Anteil	Sieb	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
0,06/1	52	D [%]	0,0	1,3	2,7	12,0	44,0	51,5	52,0
0,06/1	48	D [%]	0,0	0,6	2,7	10,7	40,0	47,7	48,0
Gesamt	100,0	D [%]	0,0	2,0	5,3	22,7	84,0	99,2	100,0

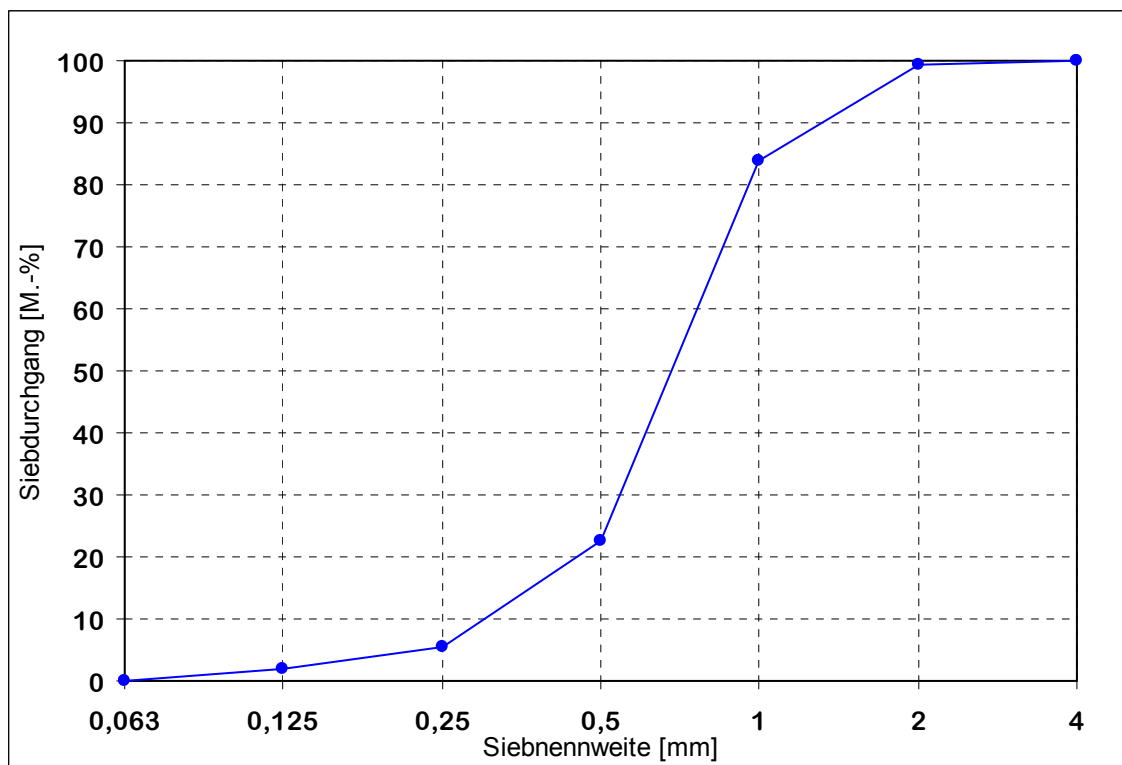


Abbildung 3-1: Sieblinie Quarzsand

Die Korngrößenverteilung von Quarzmehl wurde dem Produktdatenblatt der Firma *Feichtinger* entnommen [28]. Die Tabelle sowie die entsprechenden Sieblinien befinden sich in Tabelle 3-2 bzw. Abbildung 3-2.

Tabelle 3-2: Sieblinienberechnung Quarzmehl

Siebung Quarzmehl 1600 und 16900

Körnung	E (f) [gr]	Sieb	2	5	10	20	40	63	71	90	100	125	160
1600	99	R[gr]	99	96	91	78	53	34	28	19	14	8	3
Feuchte	A (tr) [gr]	R[%]	100,0	97,0	91,9	78,8	53,5	34,3	28,3	19,2	14,1	8,1	3,0
0,0%	99	D[%]	0	3,0	8,1	21,2	46,5	65,7	71,7	80,8	85,9	91,9	97,0

Körnung	E (f) [gr]	Sieb	2	5	10	20	40	63	71	90	100	16	125
16900	90	R[gr]	90	70	56	30	3	0	0	0	0	0	0
Feuchte	A (tr) [gr]	R[%]	100,0	77,8	62,2	33,3	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0%	90	D[%]	0	22,2	37,8	66,7	96,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Körnung	% - Anteil	Sieb	2	5	10	20	40	63	71	90	100	16	125
1600	52	D[%]	0,0	1,6	4,2	11,1	24,3	34,4	37,6	42,3	45,0	48,1	50,8
16900	48	D[%]	0,0	10,6	18,0	31,7	46,0	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6
Gesamt	100,0	D[%]	0,0	12,2	22,2	42,9	70,4	82,0	85,2	89,9	92,6	95,8	98,4

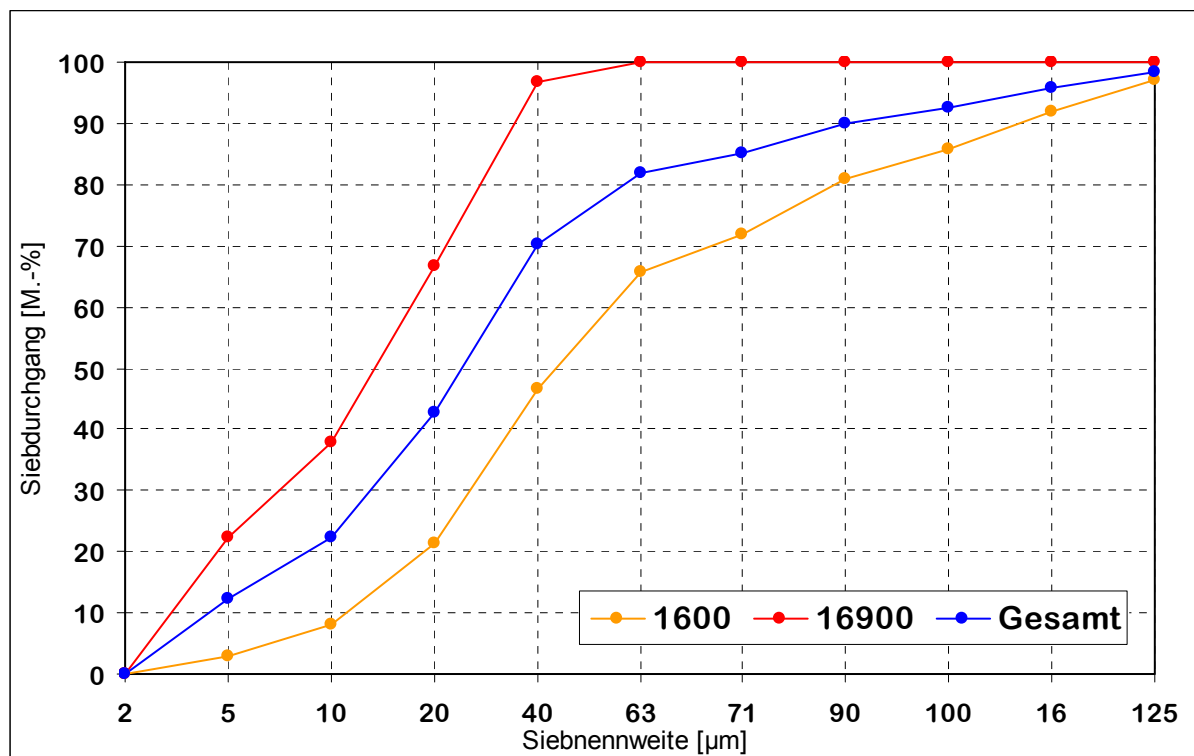


Abbildung 3-2: Sieblinie Quarzmehl

Da die Messung der Sieblinie des Quarzmehls erst nach Durchführung der Versuche im Labor erfolgte, wurde für die Mischungsberechnung die Menge des Mehls der Maschenweite 1600 Mikron und die der Maschenweite 16900 Mikron mit jeweils 50 % angenommen. Es wurde wie folgt vorgegangen:

1. Mischungsberechnung,
2. Sieblinie gemessen,
3. In der Mischungsberechnung angenommener Siebdurchgang entspricht wirklich den Ergebnissen des Siebversuchs.

3.2.2 Mischungsentwurf

Da es nicht Gegenstand dieser Arbeit war, unterschiedliche Betonrezepte zu untersuchen, wurde von einem bekannten und bewehrten Rezept ausgegangen. Dafür wurde der Mischungsentwurf ME6 der Arbeit von *Michael Lins* [18], der ebenso mit UHPC arbeitete, herangezogen (Tabelle 3-3). Die Auswahl begründet sich mit der höchsten Druck- und Biegezugfestigkeit aller untersuchten Rezepte (Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4).

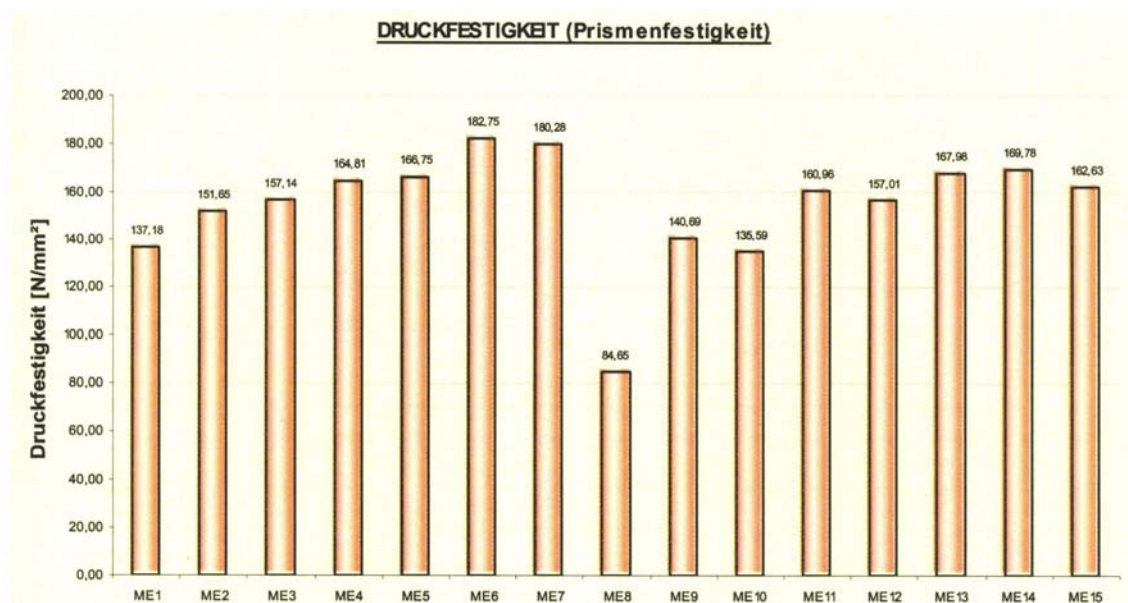
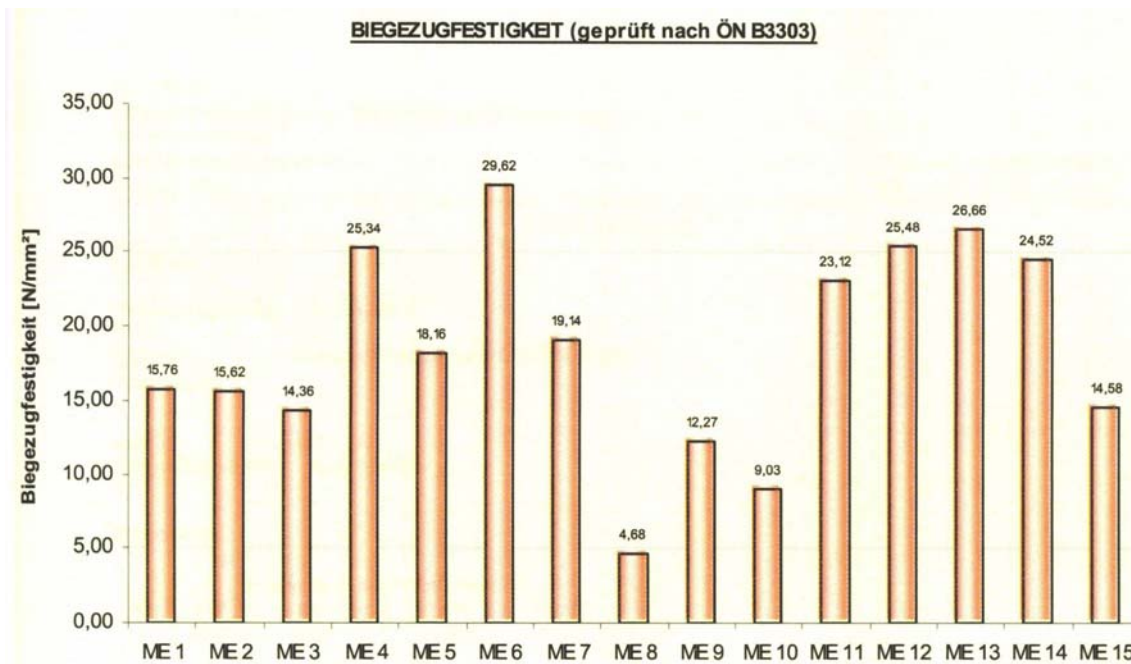


Abbildung 3-3: Druckfestigkeiten *Michael Lins* [18]

Abbildung 3-4: Biegezugfestigkeiten *Michael Lins* [18]Tabelle 3-3: Mischungsentwurf ME6 von *Michael Lins* [18]

Mischungsentwurf ME6 Michael Lins				
Bestandteile	Bezeichnung	Hersteller	Gewicht [kg]	Volumen [m³]
Quarzsand	Zuschlag 0,06/1	Fa. Kies Union	1179	0,445
Quarzmehl	Zuschlag	Fa. Eckart	70	0,03
Summe Zuschläge			1249	0,475
Wasser			175	0,175
Verflüssiger	Glenium 115 M	MBT Austria	21	0,019
Zement	CEM I 42,5 R (HS) WT 33	Fa. Wopfinger & Perlmöser	700	0,226
Mikrosilica	Grade 940-U	Elken Materials	140	0,067
Stahlfasern	6/.16 (12/.16)	Fa. Bekaert	300	0,038
Summe Gesamt			2585	1

Im Rahmen von Vorversuchen wurde das Rezept erprobt. Um die optimale Konsistenz und Verarbeitbarkeit des UHPC herauszufinden, wurden in der Woche vor Beginn der Versuchsmischungen einige Probemischungen durchgeführt.

Es stellte sich heraus, dass eine erhöhte Zugabe von Fließmittel erforderlich ist, um eine optimale Konsistenz des zu verarbeitenden Frischbetons zu erreichen. Mit 4,5 % bezogen auf die Zementmenge ist der Fließmittelgehalt laut Herstellerangaben zwar zu hoch, doch notwendig. Weiters wurde der Wassergehalt auf 180 l erhöht und der Luftgehalt von ursprünglich 1,5 % auf 4 % angepasst. Mit diesen Mengen lässt sich eine gute Konsistenz des Betons erzielen.

In Abbildung 3-5 sind die Bestandteile für eine Mischung explizit dargestellt.



Abbildung 3-5: Zutaten für eine Betonmischung

Weiters wurden unterschiedliche Schemas der Mischreihenfolge der Zutaten erprobt, um zu sehen, welches die besten Ergebnisse bezüglich der Verarbeitbarkeit des Betons, als auch der Herstellung der Mischung liefert. Dabei erwies sich die von *J. Horvath* vorgeschlagene Anordnung am besten. Zuerst werden alle Feinanteile, also Zement, Quarzmehl und Mikrosilica, in einer variabel langen Zeit homogenisiert. Danach wird der Sand beigefügt und nach 45 s Untermengen werden schließlich die flüssigen Bestandteile Wasser, Fließmittel und Entschäumer hinzugefügt. Eine lange Nachmischzeit von 7 min erwies sich als essentiell.

Der Mischungsentwurf sowie der Mischvorgang sind aus Tabelle 3-4 zu entnehmen.

Tabelle 3-4: Mischungsberechnung

Mischungsberechnung							
durchgeführt von:		Karin Safranek					
Ort:		Labor 1003, Adolf-Blamauergasse 1-3					
Datum:		Juli, August 2005					
Zweck:		Diplomarbeit					
1. Anforderungen							
Betonsorte:	UHPC		Bindemittelgehalt	854 kg			
Zement:	CEM I /H-S 42,5R		W/B	0,21			
Zuschlag:	0-1		k	2			
Zusatzmittel	FM, Entschäumer		Zugabe von ZS	11 %			
Zusatzstoff	MS						
Konsistenz:	plastisch		Luftporen	4 %			
2. Stoffbedarf							
		Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm³]	Stoffraum [dm³]			
Wasser		180	1	180,0			
Zement		700,0	3,1	225,8			
Mikrosilica		140,0	2,3	60,9			
Fließmittel % Zement	4,5	31,5	1,08	29,2			
Entschäumer % FM	0,1	0,0315	0,965	0,033			
Zuschlag		1229,9	2,65	464,1			
Luftporen		0	0	40,0			
Frischbetonrohddichte		2281		1000,0			
3. Bestandteile							
	Anteil [%]	Trockeng. [kg]	Rohdichte [kg/dm³]	Stoffraum [dm³]	Wassergehalt [%] [l]		GESAMT [kg/m³]
Quarzmehl 16900	2,85	35,0	2,65	13,2	0	0	35,0
Quarzmehl 1600	2,85	35,0	2,65	13,2	0	0	35,0
Quarzsand 06/1	94,31	1159,9	2,65	437,7	6,4	74,2	1234,2
***	100	1229,9		464,1		74,2	1304,2
				Wasser gesamt [l/m³]:		105,8	
4. Mischung							
				Volumen	0,03 m³		
Komponenten	Bezeichnung		Einwaage				
Quarzmehl 16900	Fa. Feichtinger		1,05	kg			
Quarzmehl 1600	Fa. Feichtinger		1,05	kg			
Quarzsand 06/1	Fa. Kies Union		37,02	kg			
Wasser			3,17	l			
Zement	CEM I /H-S 42,5 R		21,00	kg			
Mikrosilica	Fa. Elkem, Grade 940-U		4,20	kg			
Fließmittel % Zement	Duriment LZF		945	g			
Entschäumer % FM	Duriment Entschäumer T		0,9	g			
5. Mischreihenfolge und Zeit							
	Zeit [s]						
1) Cem, MS,QM	45	90	135				
2) QS	45						
3) H2O, FM, Ents	30						
4) Nachmischen	420						

3.2.3 Mischvorgänge

Die variablen Parameter beim Mischvorgang sind die Dauer der Homogenisierung der Feinstoffe und die Geschwindigkeit des Wirblers. Bei der Dauer wurden drei Abstufungen, nämlich 45 s, 90 s und 135 s gewählt. Die dabei vorhandene Geschwindigkeit blieb von Beginn des Mischvorgangs bis zum Ende gleich.

Die Geschwindigkeit wurde in vier Abstufungen variiert. Die Normalgeschwindigkeit mit 40% Wirblergeschwindigkeit stellt eine Referenz zu einem herkömmlichen Betonmischer dar. Alle weiteren Geschwindigkeiten wurden verringert bzw. erhöht, um die Grenzen der Maschine zu testen.

Die Kombination von drei Zeitdauern der Homogenisierung mit jeweils vier unterschiedlichen Mischgeschwindigkeiten ergibt 12 Mischungen pro Wirbler. Ein Überblick wird in Tabelle 3-5 gegeben.

Tabelle 3-5: Mischgeschwindigkeiten und Homogenisierungszeiten

Sternwirbler	Homogenisierung [s]	Normal- geschwindigkeit v_0	verlangsamte Geschwindigkeit v_1	erhöhte Geschwindigkeit v_2	stark erhöhte Geschwindigkeit v_3
	45	<i>M1a</i>	<i>M4a</i>	<i>M7a</i>	<i>M10a</i>
	90	<i>M2a</i>	<i>M5a</i>	<i>M8a</i>	<i>M11a</i>
	135	<i>M3a</i>	<i>M6a</i>	<i>M9a</i>	<i>M12a</i>
Stiftenwirbler	Homogenisierung [s]	Normal- geschwindigkeit v_0	verlangsamte Geschwindigkeit v_1	erhöhte Geschwindigkeit v_2	stark erhöhte Geschwindigkeit v_3
	45	<i>M1b</i>	<i>M4b</i>	<i>M7b</i>	<i>M10b</i>
	90	<i>M2b</i>	<i>M5b</i>	<i>M8b</i>	<i>M11b</i>
	135	<i>M3b</i>	<i>M6b</i>	<i>M9b</i>	<i>M12b</i>
Geschwindigkeiten	Topfgeschwindigkeit [%]		Wirblergeschwindigkeit [%]		
	v_0	50	1,10	40	5,52
	v_1	50	1,10	10	1,38
	v_2	50	1,10	60	8,28
	v_3	50	1,10	90	12,42

Eine Wirblergeschwindigkeit von 13,80 m/s entspricht 100% der möglichen Geschwindigkeit der Maschine.

Die zwei Mischwerkzeuge, die zum Einsatz kamen, sind, wie schon vorweg erwähnt, der Stern- und der Stiftenwirbler. Siehe dazu Abbildung 3-6.



(a)



(b)

Abbildung 3-6: Mischwerkzeuge: Sternwirbler (a) und Stiftenwirbler (b)

3.2.4 Prüfungsplanung

Die Versuchsdurchführung besteht aus der Herstellung von 30 l Frischbeton und den darauf folgenden Prüfungen. Zur Prüfung der Frischbetoneigenschaften werden das Ausbreitmaß und der Luftporengehalt bestimmt.

Die Festbetoneigenschaften werden anhand der Druck- und Biegezugfestigkeit gemessen. Pro Mischung ist die Herstellung von drei Würfeln mit den Abmessungen 10x10x10 cm und einem Prisma mit den Abmessungen 10x10x40 cm geplant. Die Würfeln werden jeweils nach einem, nach 7 und nach 28 Tagen geprüft. Die Prüfung des Prismas erfolgt nach 28 Tagen.

Die Probekörperherstellung und Lagerung erfolgte nach ÖNORM B 3303. Diese schreibt vor, dass der Probekörper nach frühestens 16 Stunden, maximal aber nach drei Tagen auszuschalen ist und danach 7 Tage im Wasserbad zu lagern hat. Die weitere Lagerung erfolgt bei Raumluft.

Ebenfalls geplant ist die Bestimmung der Porosität des festen Betons mittels Quecksilberporosimetrie.

Um alle Mischungen rasch und effizient herstellen zu können und in weiterer Folge alle Prüfungen zeitgerecht durchzuführen, war ein detaillierter Zeitplan erforderlich. Siehe dazu Tabelle 3-6.

Tabelle 3-6: Zeitplanung

	Mischung	Festigk. 1d	Festigk. 7d	Festigk. 28d
Mo 08.08.2005			M10b M11b M12b	
Di 09.08.2005				
Mi 10.08.2005				
Do 11.08.2005				
Fr 12.08.2005				

Mo 15.08.2005				
Di 16.08.2005				M1a M2a M3a
Mi 17.08.2005				M4a M5a M6a
Do 18.08.2005				M7a M8a M9a
Fr 19.08.2005				

Mo 22.08.2005				M10a M11a M12a
Di 23.08.2005				M1b M2b M3b
Mi 24.08.2005				M4b M5b M6b
Do 25.08.2005				M7b M8b M9b
Fr 26.08.2005				

Mo 29.08.2005				M10b M11b M12b
---------------	--	--	--	----------------------

Mo 18.07.2005				
Di 19.07.2005	M1a M2a M3a			
Mi 20.07.2005	M4a M5a M6a	M1a M2a M3a		
Do 21.07.2005	M7a M8a M9a	M4a M5a M6a		
Fr 22.07.2005		M7a M8a M9a		

Mo 25.07.2005	M10a M11a M12a			
Di 26.07.2005	M1b M2b M3b	M10a M11a M12a	M1a M2a M3a	
Mi 27.07.2005	M4b M5b M6b	M1b M2b M3b	M4a M5a M6a	
Do 28.07.2005	M7b M8b M9b	M4b M5b M6b	M7a M8a M9a	
Fr 29.07.2005		M7b M8b M9b		

Mo 01.08.2005	M10b M11b M12b			M10a M11a M12a
Di 02.08.2005		M10b M11b M12b		M1b M2b M3b
Mi 03.08.2005				M4b M5b M6b
Do 04.08.2005				M7b M8b M9b
Fr 05.08.2005				

4 Versuchsdurchführung und Auswertung

4.1 Allgemeines

Es galt herauszufinden, auf welche Art und Weise der Mischprozess die Homogenität der Gefügestruktur von UHPC beeinflusst. Um darüber Aussagen zu tätigen und Ergebnisse vergleichen zu können, wurden Prüfungen an Frisch- sowie Festbeton durchgeführt. Weiters wurde der Energieeintrag jeder Mischung untersucht.

Im Detail wird wie folgt vorgegangen:

Es werden Probekörper aus UHPC hergestellt. Das Rezept und die Menge bleiben bei jeder Mischung gleich. Variabel sind die Dauer der Homogenisierung der Feinstoffe sowie die Geschwindigkeit des Wirblers. Weiters werden alle Mischungen einmal mit dem Sternwirbler und ein zweites Mal mit dem Stiftenwirbler hergestellt.

Die Mischungen werden anhand von Frisch- (Luftgehalt und Ausbreitmaß) und Festbetonprüfungen (Druck- und Biegezugfestigkeit), sowie mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie untersucht. Dabei sollen ein geringer Luftgehalt, eine plastische Konsistenz des Frischbetons, sowie hohe Druck- und Biegezugfestigkeiten des Festbetons auf eine optimale Homogenität und somit eine ideale Mischung schließen.

Aufgrund der Herstellung der Mischungen mit dem *Eirich*-Mischer ist es möglich, die Energieeinträge aller Mischungen untereinander zu vergleichen. Es wird untersucht, ob ein höherer Leistungsverbrauch auch eine bessere Durchmischung des Mischguts und somit eine bessere Homogenität bewirkt.

Im Folgenden werden die durchgeführten Prüfungen beschrieben, sowie die Ergebnisse dargestellt und interpretiert. Dazu ist anzumerken, dass keine Ergebnisse der Mischungen M5b und M6b existieren. Bei allen Mischungen, die mit dem Stiftenwirbler mit nur 10 % Geschwindigkeit durchgeführt wurden, kam es zu Fehlermeldungen seitens der Maschine und die Mischvorgänge mussten abgebrochen werden. Mischung M6b wurde aus diesem Grund nicht hergestellt. Wieso die Betonherstellung im *Eirich*-Mischer mit geringer Geschwindigkeit nicht möglich war, wird im Folgenden erklärt.

Unten abgebildet (Abbildung 4-1) sind der *Eirich-Intensivmischer R08W* sowie der dazugehörige Steuerungsschrank, über den alle Mischprozesse abgewickelt wurden.



Abbildung 4-1: Eirich-Intensivmischer R08W

Das Gerät ist computergesteuert und wird über den sich im Steuerungsschrank befindenden Touch-Screen bedient (siehe Abbildung 4-2).

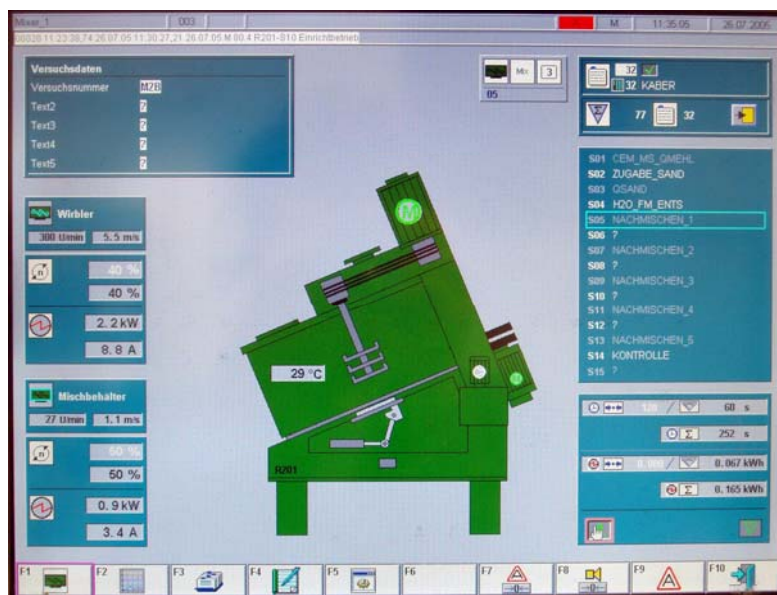


Abbildung 4-2: Steuerung des Mixers über den Touch-Screen

Während des Mischvorgangs wird laufend die Mischleistung aufgezeichnet und steht dem Benutzer sofort zur Verfügung (Abbildung 4-3).

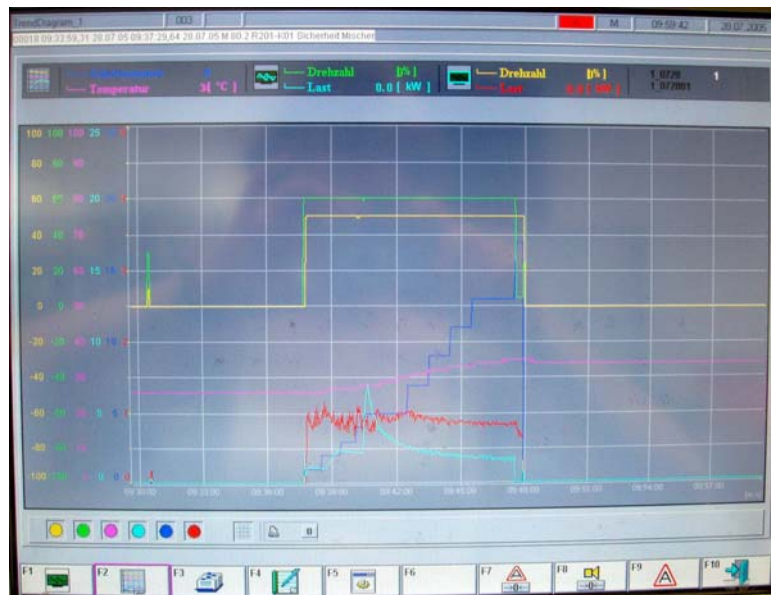


Abbildung 4-3: Aufzeichnung der Leistung während des Mischvorganges

4.2 Mischleistung

Erst durch die Entwicklung der *Eirich-Mischtechnik* ist es möglich geworden, die Mischarbeit in Form der Mischleistung aufzuzeichnen. Das in Kapitel 2.1.5.3 genauer erläuterte Thema wird im Folgenden kurz zusammengefasst. Es wird ein einfacher Mischer mit einem *Eirich*-Mischer verglichen:

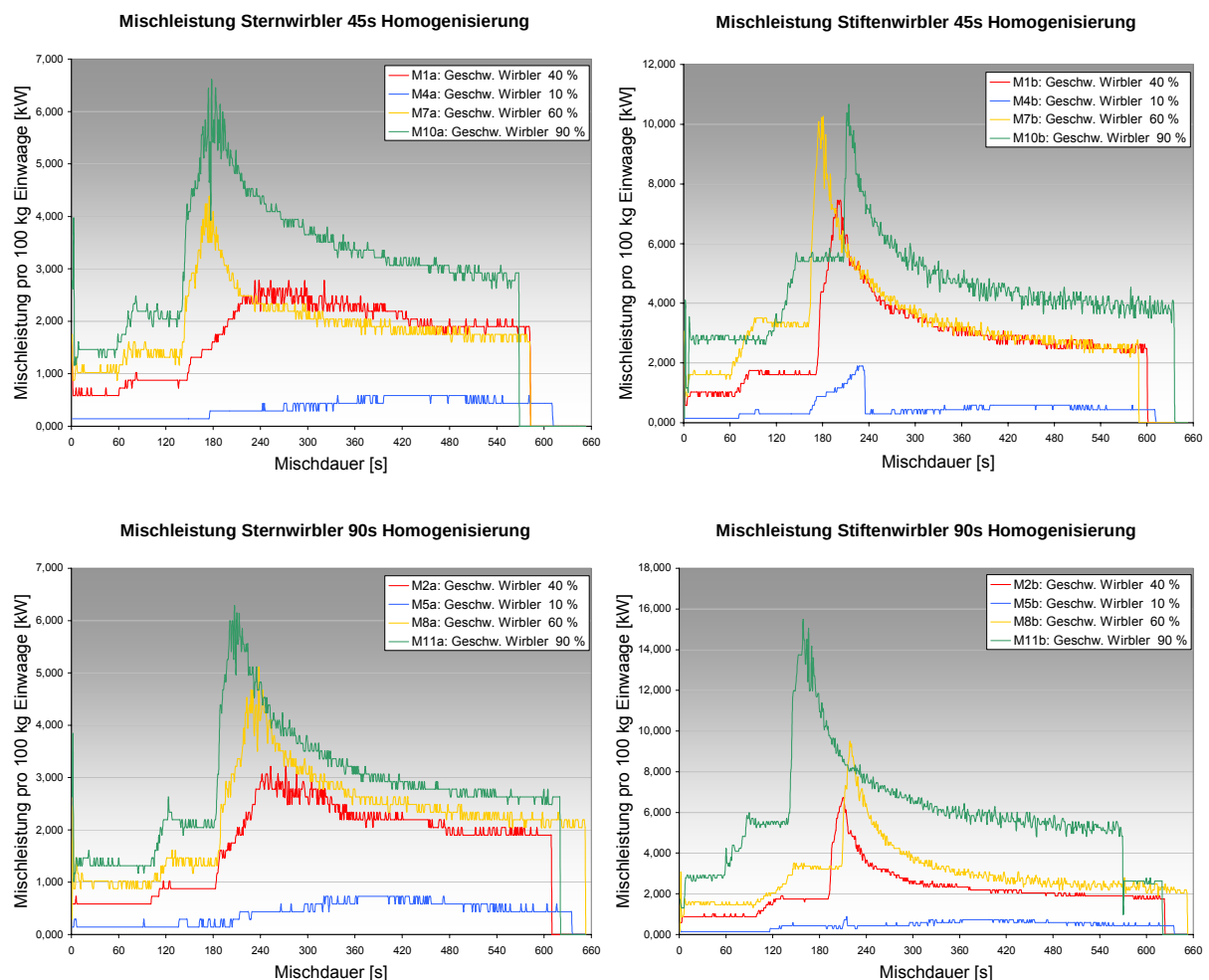
Tabelle 4-1: Vergleich eines einfachen Mixers mit einem *Eirich*-Mischer

Einfacher Mischer	<i>Eirich</i> -Mischer
Mischbehälter steht still	Mischbehälter ist in rotierender Bewegung
Ein rotierendes Werkzeug transportiert das Mischgut	Der Behälter transportiert das Mischgut
Reibung des Mischguts an Wand und Boden des Behälters -> Verschleiß	Reibung des Mischguts nur innerhalb, keine Wand- und Bodenreibung
Mischleistung geht verloren	Mischleistung bleibt erhalten
Elektrische Arbeit = Mischarbeit + Reibungsarbeit + Verschleißarbeit	Elektrische Arbeit = Mischarbeit

Bei einem Mischprozess in einem *Eirich*-Mischer treten aufgrund der geometrischen Gegebenheiten (vgl. dazu Tabelle 4-1) während des Mischvorganges kaum Reibung und Verschleiß am Gerät auf. Deswegen kann man von der ins System eingebrachten Arbeit auf die für die Mischung notwendige Leistung schließen. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} = \frac{\text{Kraft} \cdot \text{Weg}}{\text{Zeit}} = \text{Kraft} \cdot \text{Geschwindigkeit} \quad \text{Formel 4-1: Leistung}$$

Aus Formel 4-1 geht hervor, dass der Leistungseintrag mit höher werdender Geschwindigkeit steigt. Siehe dazu Abbildung 4-4. Es ist möglich, die einzelnen Leistungseinträge untereinander zu vergleichen, da die Einwaage jeder Mischung 68,44 kg betrug und die Mischleistung bei null kg Einwaage vernachlässigbar klein ist. Um das Vergleichen auch mit anderen Mischungen zu ermöglichen, wurde die Leistung des Wirblers auf 100 kg Einwaage hochgerechnet.



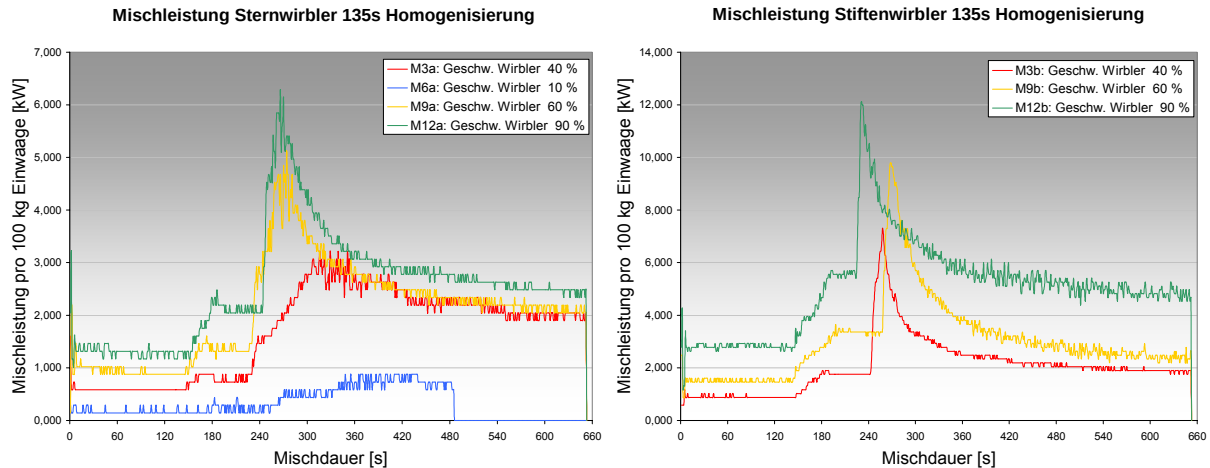


Abbildung 4-4: Auswertung der Mischleistung bezogen auf 100 kg Einwaage

Abbildung 4-4 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Leistung und Geschwindigkeit. Mit höher werdender Geschwindigkeit steigt der Leistungseintrag in den Mischvorgang.

Der blaue Graph stellt alle Mischungen mit 10 % (1,38 m/s) Wirblergeschwindigkeit dar. Bei Mischung M6b (Stiftenwirbler, 135 s Homogenisierung, 10 % Wirblergeschwindigkeit) war der Leistungseintrag sogar so gering, dass die Mischmaschine nicht ausreichend Kraft zur Verfügung hatte, um das Mischgut zu bewegen, und den Mischvorgang stoppte.

Der rote Graph stellt alle Mischungen, die mit 40 % (5,52 m/s) Wirblergeschwindigkeit gemischt wurden dar. Der Leistungseintrag ist in allen Fällen geringer als jener der Mischungen mit 60 % (8,28 m/s) Geschwindigkeit (gelber Graph).

Die Leistungsspitzen wurden nur von Mischungen erreicht, die mit einer Wirblergeschwindigkeit von 90 % (12,42 m/s) hergestellt wurden (grüner Graph).

In Abbildung 4-5 werden die Leistungen untereinander verglichen. Dazu wird der Parameter Geschwindigkeit konstant gehalten.

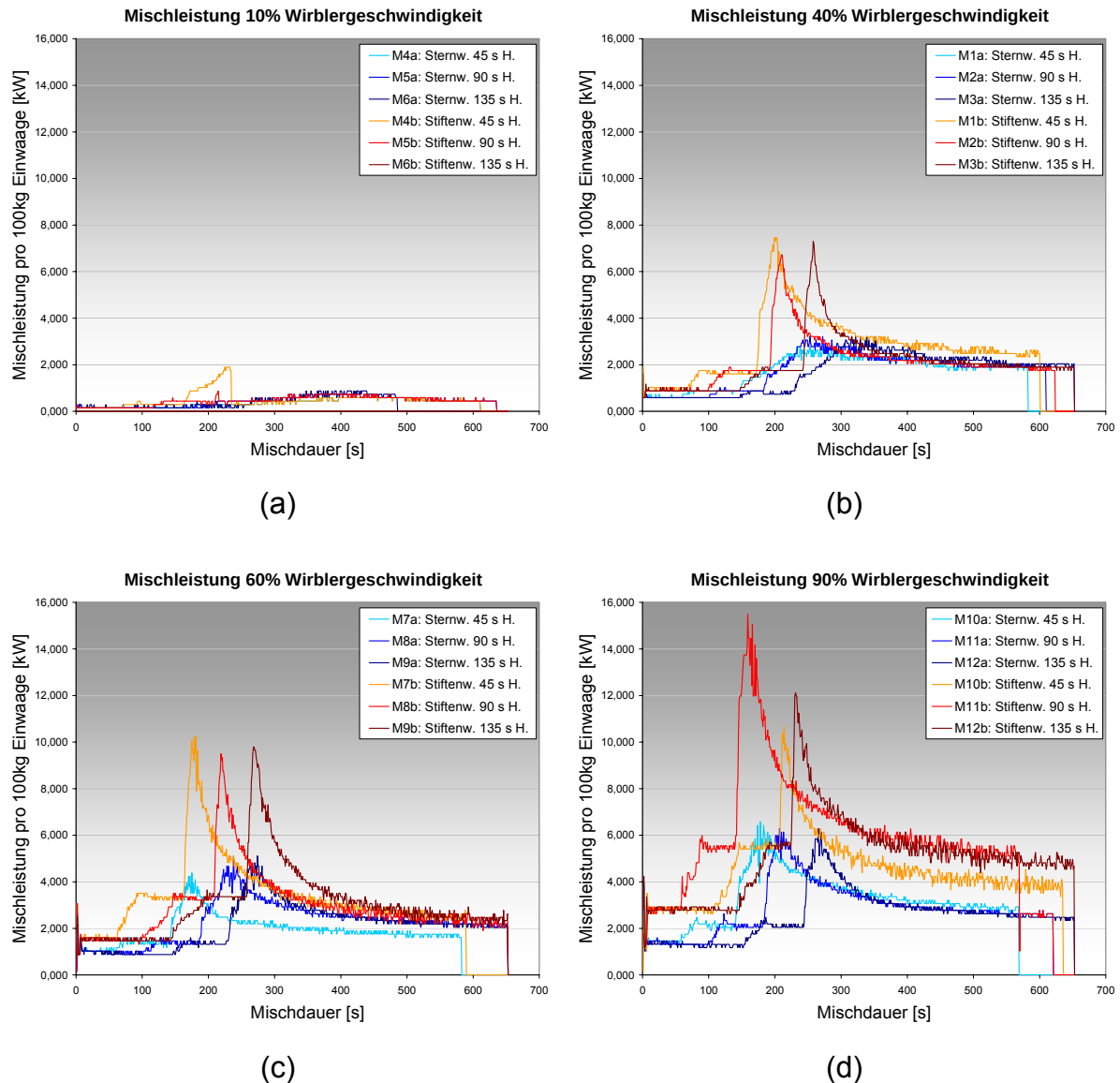


Abbildung 4-5: Vergleich der Mischleistung abhängig von der Geschwindigkeit

Bei einer Wirblergeschwindigkeit von 10 % erreicht Mischung M4b (Stifenwirbler, 45 s Homogenisierung, 10 % Geschwindigkeit) eine Leistung von knapp 2 kW. Alle anderen Mischungen mit langsamer Geschwindigkeit (10 %) erreichen eine Spitzenleistung von rund 1 kW (vgl. dazu Abbildung 4-5 a).

Bei Normalgeschwindigkeit des Wirblers (40 %) ist eindeutig erkennbar, dass jene Mischungen, die mit dem Stifenwirbler hergestellt wurden (M1b, M2b und M3b) weitaus höhere Leistungsspitzen, nämlich rund 7 kW erreichen, als die Mischungen, die mit dem Sternwirbler gemischt wurden (M1a, M2a und M3a). Letztere erreichen eine Maximalleistung von ca. 3 kW (vgl. dazu Abbildung 4-5 b).

Ähnlich wie bei einer Wirblergeschwindigkeit von 40 % verhält sich der Leistungseintrag der Mischungen, die mit 60 % der Geschwindigkeit hergestellt wurden (M7a, M8a, M9a, M7b, M8b und M9b). Der Leistungseintrag der mit dem Stiftenwirbler gemischten Proben liegt bei knapp 10 kW und ist damit doppelt so hoch wie jener der mit dem Sternwirbler hergestellten Mischungen. Die Leistungsspitzen der Mischserie „Sternwirbler“ liegen zwischen 4 und 5 kW (vgl. dazu Abbildung 4-5 c).

Den höchsten Leistungseintrag erreichen logischerweise die Mischungen, die mit höchster Geschwindigkeit (90 %) hergestellt wurden. Mischung M11b (Stiftenwirbler, 90 s Homogenisierung, 90 % Geschwindigkeit) erreicht mit 15,49 kW die insgesamt höchste Leistung. Die beiden anderen Mischungen mit 90 % Geschwindigkeit, hergestellt mit dem Stiftenwirbler (M10b und M12b), liegen bei 10,67 bzw. 12,13 kW. Auffallend ist wiederum, dass alle Mischungen der Serie „Sternwirbler“ (M10a, M11a und M12a) eine weitaus geringere Spitzenleistung erreichen (vgl. dazu Abbildung 4-5 d).

Die spezifische Mischleistung ergibt sich aus der effektiven Motorbelastung und aus dem Gewicht der Mischung. Die Dimension ist kW/100 kg oder kW/t. Die Mischarbeit (in kW/h) errechnet sich aus der spezifischen Mischleistung und der Mischzeit. Siehe dazu Formel 4-2.

$$E = \int L \cdot dt = \sum_{i=0}^n L_i \cdot \Delta t_i$$

Formel 4-2: Arbeit

L ...Leistung[kW]

t ...Mischdauer[h]

Um die Arbeit der einzelnen Mischungen vergleichen zu können, wurden die in Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 dargestellten Leistungseinträge nach Formel 4-2 in Mischenergie (=Mischarbeit) umgerechnet. Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 zeigen die Ergebnisse im Vergleich, getrennt nach Stern- und Stiftenwirbler.

Abbildung 4-8 stellt die Ergebnisse beider Mischwerkzeuge gegenüber.

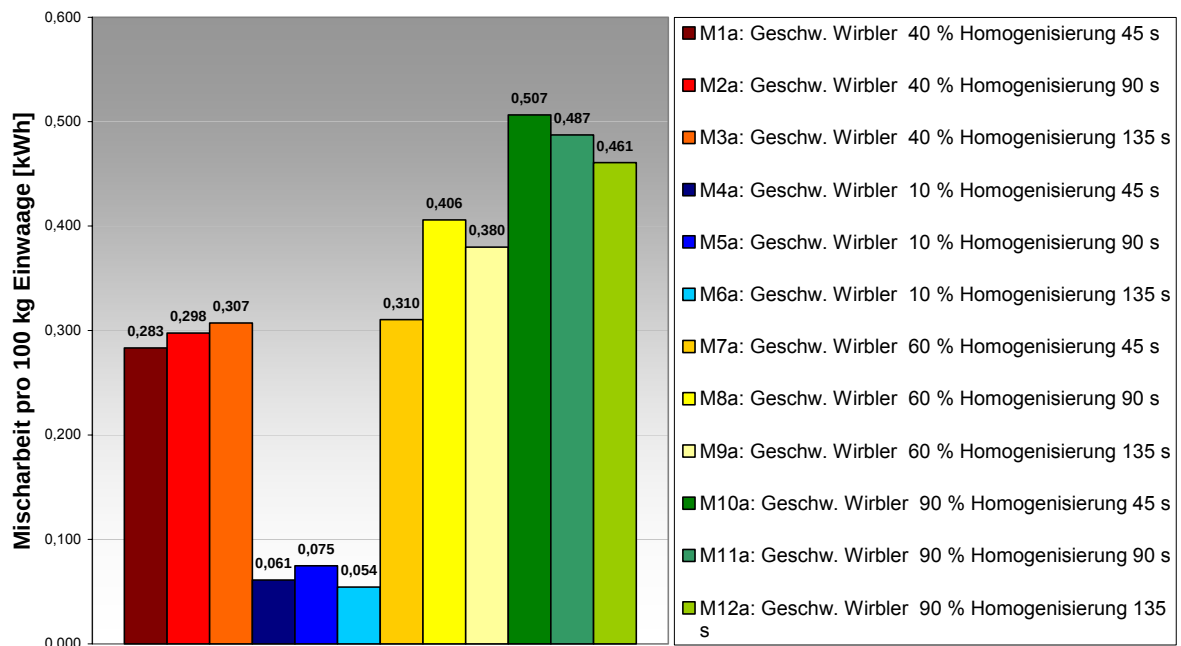


Abbildung 4-6: Mischarbeit Sternwirbler pro 100 kg Einwaage

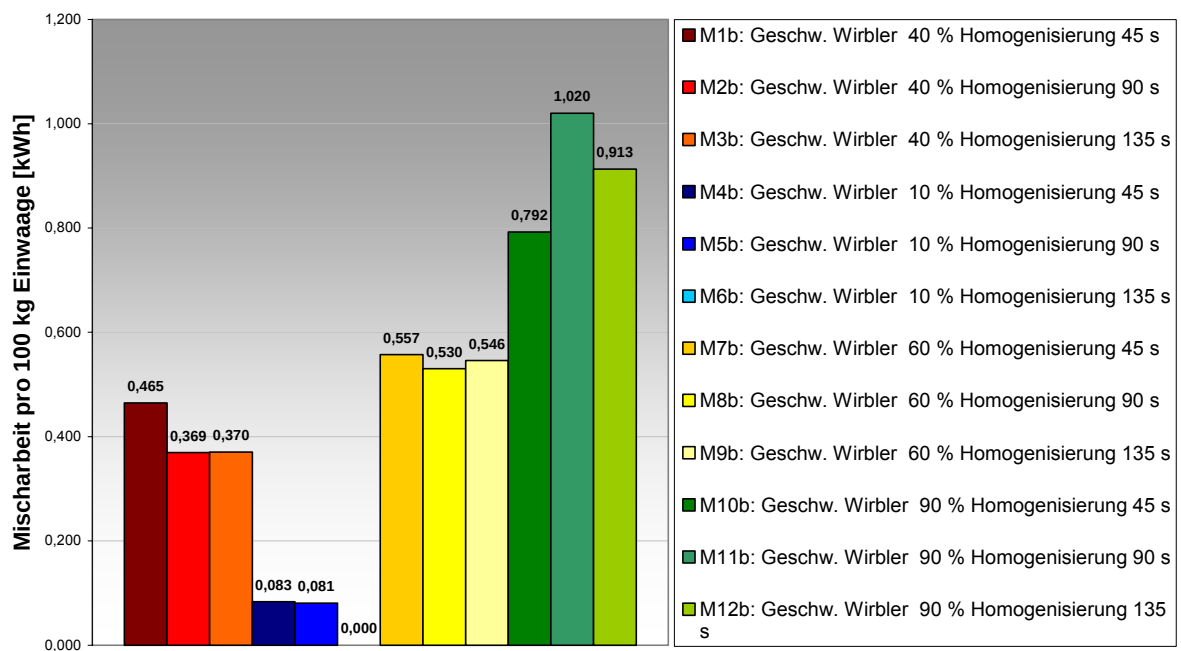


Abbildung 4-7: Mischarbeit Stiftenwirbler pro 100 kg Einwaage

Es zeigt sich sehr deutlich, dass die Form des Mischwerkzeuges den Mischprozess wesentlich beeinflusst. Die Mischvorgänge mit dem Stiftenwirbler benötigen fast doppelt so viel Energie, wie die mit dem Sternwirbler (siehe dazu Abbildung 4-8). Der höchste Energieeintrag mit dem Sternwirbler wurde bei Mischung M10a (45 s

Homogenisierung, 90 % Wirblergeschwindigkeit) mit 0,607 kWh pro 100 kg Einwaage gemessen. Der höchste Energieeintrag mit dem Stiftenwirbler ergab sich bei Mischung M11b (90 s Homogenisierung, 90 % Wirblergeschwindigkeit) mit 1,020 kWh pro 100 kg Einwaage.

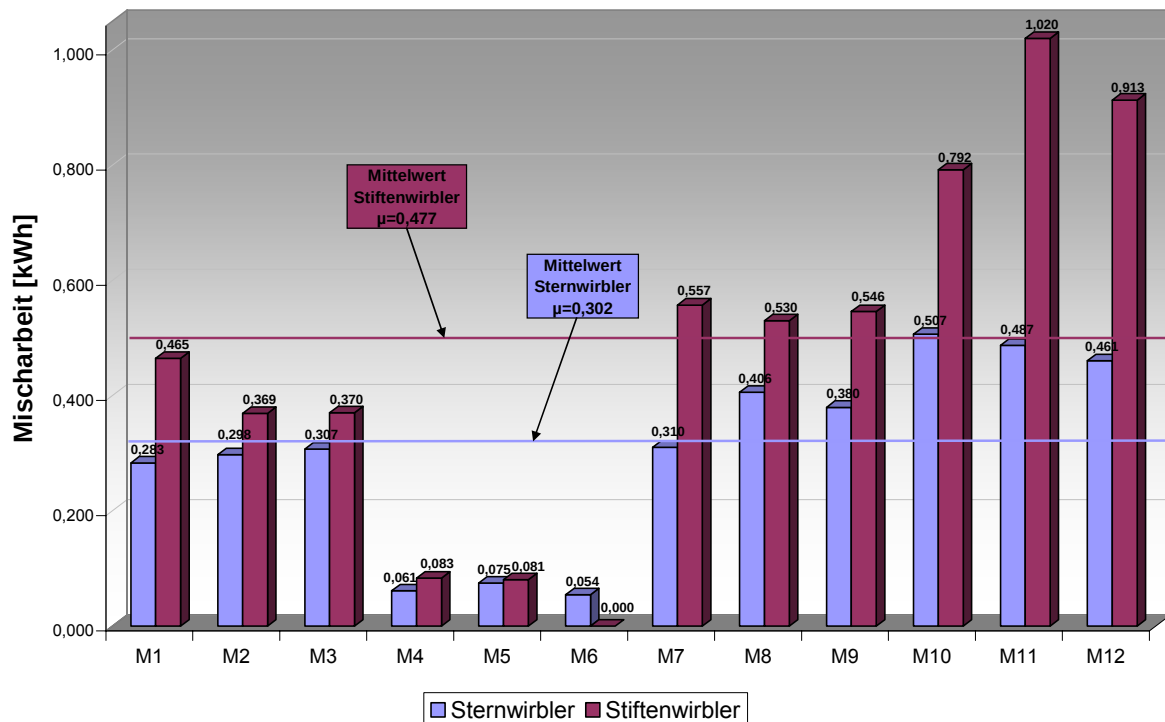


Abbildung 4-8: Mischarbeit (pro 100 kg Einwaage) beider Mischwerkzeuge im Vergleich

Der Mittelwert der Mischarbeit des Sternwirblers liegt mit 0,302 kWh weit unter dem Mittelwert der Arbeit des Stiftenwirblers (0,477 kWh). Betrachtet man die Standardabweichung σ (vergleiche dazu Kapitel 2.1.4.2) so zeigt sich, dass diese mit $\sigma = 0,155$ bei den Mischungen des Sternwirblers geringer als $\sigma = 0,311$ der Mischungen mit dem Stiftenwirbler ist. Die Arbeit der Mischserie Sternwirbler streut daher weniger als die der Serie Stiftenwirbler.

Ein höherer Leistungsverbrauch führt zu mehr Arbeit und bewirkt eine bessere Homogenität des Mischgutes und daher auch durchgehend bessere Ergebnisse bei den Frisch- und Festbetonprüfungen.

4.3 Frischbetonprüfung

Die Eigenschaften des Frischbetons beschränken sich auf die Verarbeitbarkeit und die Konsistenz.

Die Verarbeitbarkeit beschreibt die rheologischen Eigenschaften des Betons, wie die Fließgrenze, Viskosität und innere Reibung. Ebenso wird die Verarbeitbarkeit durch die Konsistenz bestimmt.

Unter Konsistenz versteht man die Steife des Frischbetons. Sie ist abhängig vom Wassergehalt, Zementgehalt, der Kornzusammensetzung und -form und von der Zugabe von Zusatzmittel wie Verflüssiger [29].

Weiters kann am Frischbeton der Luftgehalt bestimmt werden. Selbst vollständig verdichteter Beton enthält noch eine geringe Menge an Luft in Form von kleinen Bläschen. Wesentlich für die Homogenität des Betons ist ein möglichst geringer Luftgehalt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Bestimmung des Ausbreitmaßes f ,
- Bestimmung des Luftgehalts A_C mittels Druckausgleichverfahren.

4.3.1 Luftgehalt

Die Bestimmung des Luftgehaltes von Frischbeton erfolgte nach ÖNORM B 3303.

4.3.1.1 Prüfverfahren

Der frische Beton wird in einen zylindrischen Behälter gefüllt, am Rütteltisch verdichtet und plan abgestrichen. Danach wird der Behälter mit einem Verschlussaggregat druckdicht verschlossen. Der verbleibende Hohlraum wird mit Wasser über zwei Ventile gefüllt. Die Ventile werden geschlossen und das sich auf dem Deckel befindende Manometer wird durch Pumpen auf Null gestellt. Dann wird durch das Hauptventil durch einmaliges Drücken Luft entlassen. Aufgrund des Luftdruckverlustes im Behälter wird auf den Luftgehalt des Betons geschlossen, und das Manometer stellt diesen Wert in Prozent dar.

Eine Systemskizze sowie eine Abbildung der Prüfeinrichtung sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

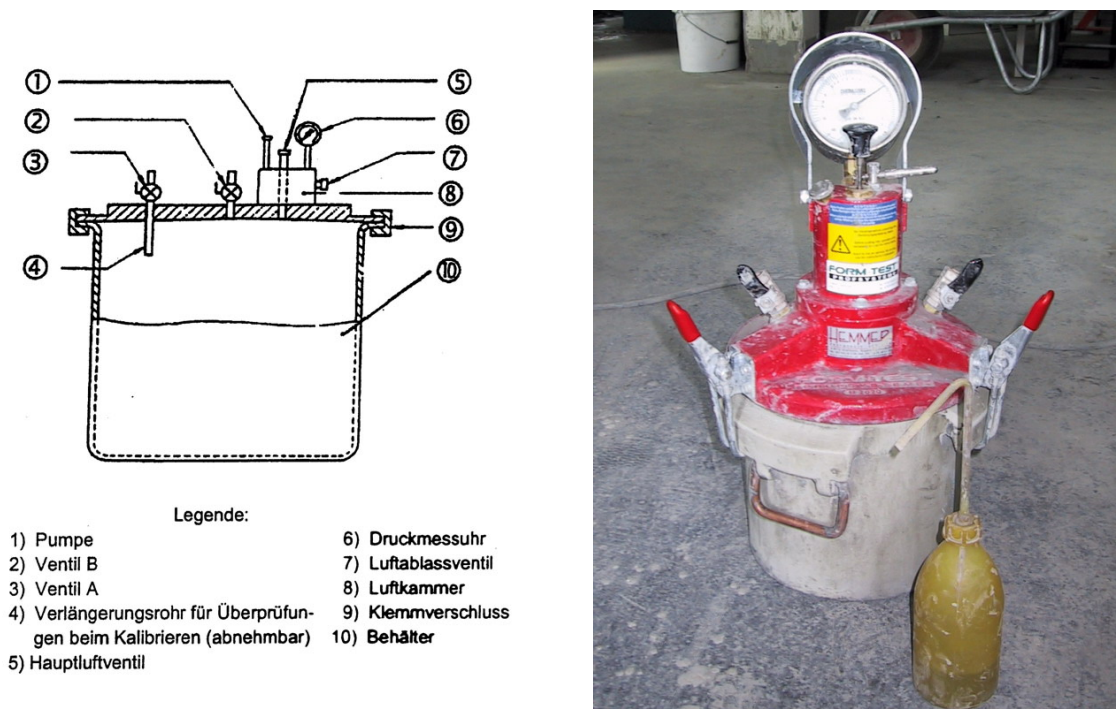


Abbildung 4-9: Druckmessgerät für Luftgehaltbestimmung von Frischbeton [49]

4.3.1.2 Ergebnisse

Der Luftgehalt des Frischbetons wurde an allen Mischungen, mit Ausnahme Mischung M5b und M6b des Stiftenwirlers, gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-10 grafisch dargestellt.

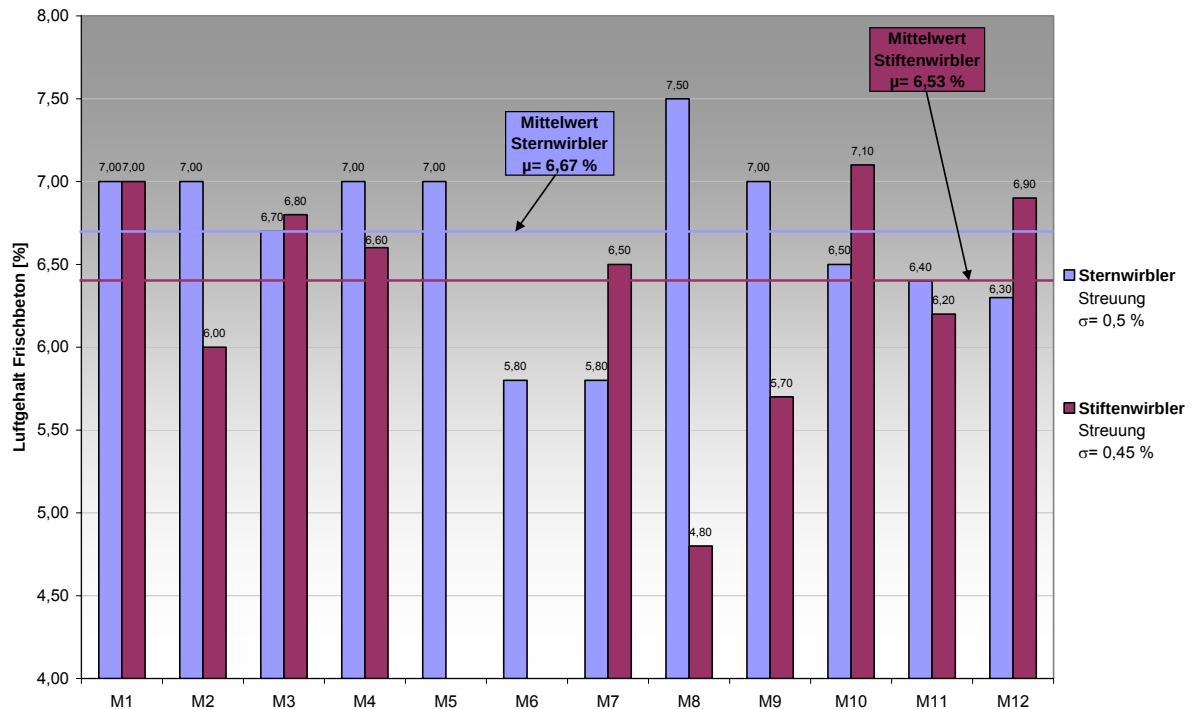


Abbildung 4-10: Ergebnisse Luftgehalt Frischbeton

Auffallend ist, dass fast alle Proben einen durchschnittlichen Luftgehalt von 6,6 % aufweisen. Das Ergebnis der Mischung M8b des Stiftenwirlblers weicht als einziges sehr vom Mittelwert ab und ist nur durch einen Messfehler am Gerät erklärbar. Daher wurde dieser Wert auch nicht bei der Berechnung des Mittelwertes berücksichtigt.

Aus dieser Auswertung ergibt sich, dass die unterschiedlichen Geschwindigkeiten bei den einzelnen Mischprozessen kaum einen Einfluss auf den Luftgehalt haben. Dadurch wirkt sich auch der Leistungseintrag nicht auf den Luftgehalt aus. Weiters kann man keine Aussage darüber machen, welcher Wirlbler mehr oder weniger Luft beim Mischvorgang in den Beton einwirbelt.

Unter der Voraussetzung der Beigabe eines Entschäumers zur Rezeptur, haben die Geschwindigkeit und das Mischwerkzeug keinen Einfluss auf den Luftgehalt im Frischbeton.

4.3.2 Ausbreitmaß

Die Bestimmung des Ausbreitmaßes erfolgte nach ÖNORM B 3303.

4.3.2.1 Prüfverfahren

Die für dieses Prüfverfahren notwendigen Geräte sind ein Ausbreittisch, eine kegelstumpfförmige Form und ein Stößel zum Verdichten des Betons. Siehe dazu Abbildung 4-11.

Der frische Beton wird in zwei Schichten in die Form gefüllt. Dabei ist jede Schicht zehnmal mit dem Stößel durch leichte Stöße zu verdichten. Die Oberfläche wird plan abgestrichen. Danach wird die Form an den Handgriffen vertikal nach oben entfernt. Der Ausbreittisch ist durch Scharniere mit seiner gleich großen Unterlage verbunden und wird nun 15-mal um 4 cm ruckfrei angehoben und wieder frei fallen gelassen. Der Beton breitet sich somit gleichmäßig aus. Der Durchmesser wird in zwei Richtungen parallel zu den Tischkanten gemessen und das Ausbreitmaß durch Mittelung dieser Werte angegeben.

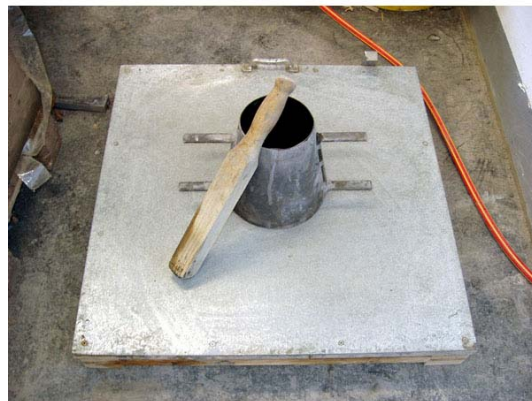
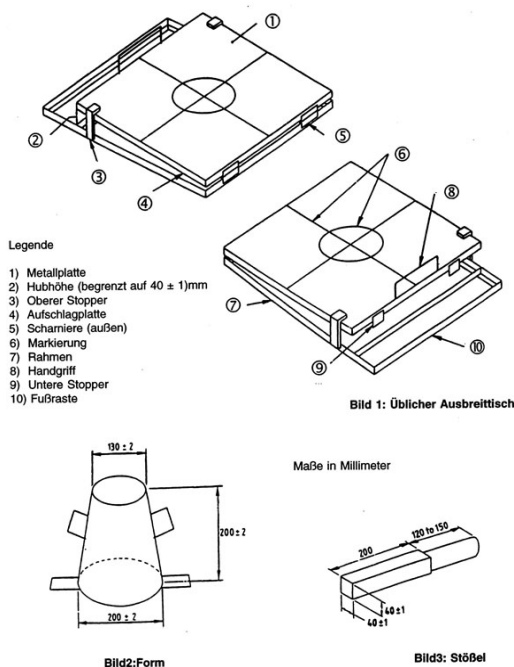


Abbildung 4-11: Ausbreittisch mit Form und Stößel [50]

4.3.2.2 Ergebnisse

In Abbildung 4-12 sind die einzelnen Ergebnisse der Ausbreitmaß Prüfung graphisch dargestellt.

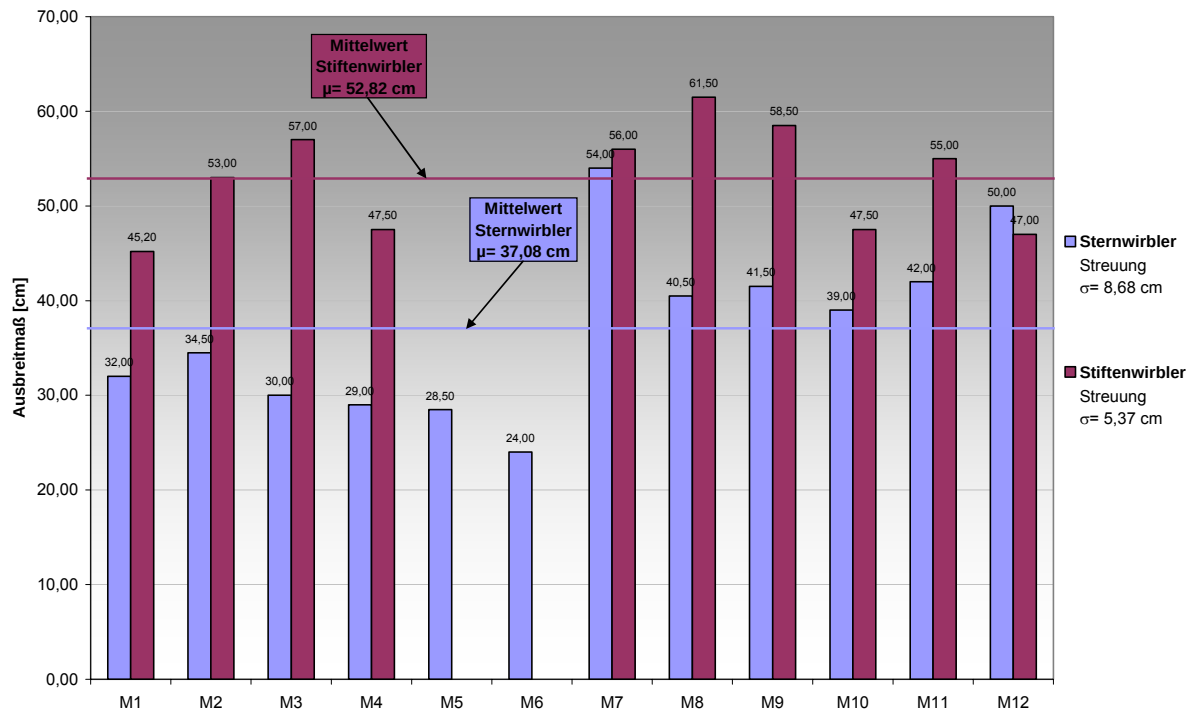


Abbildung 4-12: Ergebnisse Ausbreitmaß

Es ist eindeutig erkennbar, dass die Mischungen mit dem Stiftenwirbler eine plastischere Konsistenz ergeben, als jene mit dem Sternwirbler. Das durchschnittliche Ausbreitmaß der Mischserie Stiftenwirbler liegt bei 53 cm, das der Mischserie Sternwirbler bei 37 cm.

Weiters ist festzuhalten, dass die Mischungen mit dem Stiftenwirbler, die mit nur 10 % Geschwindigkeit gemischt wurden, frühzeitig abgebrochen werden mussten. Die Maschine konnte aufgrund der geringen Geschwindigkeit nicht genügend Kraft aufbringen und stoppte den Mischvorgang.



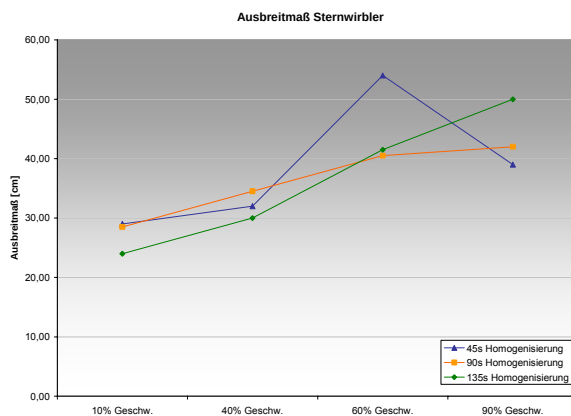
(a)



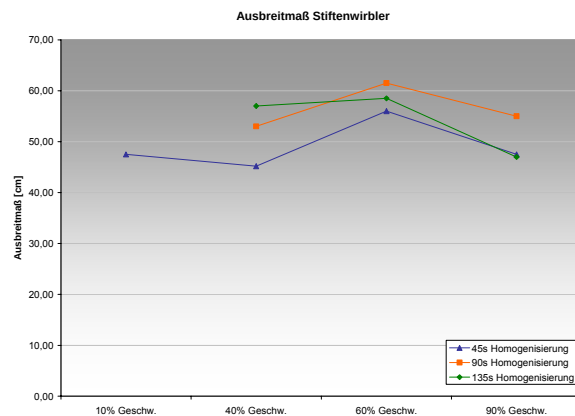
(b)

Abbildung 4-13: Ausbreitmaß Mischung M5b, Stiftenwirbler mit 10% Geschwindigkeit (a) und Mischung M12b, Stiftenwirbler mit 90% Geschwindigkeit (b)

In Abbildung 4-14 sind die einzelnen Ergebnisse des Ausbreitmaßes abhängig von der Geschwindigkeit nach Wirbler getrennt dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 4-14: Ausbreitmaß in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Bei den mit dem Sternwirbler durchgeführten Mischungen ist festzustellen, dass mit höher werdender Geschwindigkeit auch die Größe vom Ausbreitmaß steigt. Als Ausreißer wird dabei Mischung M7a (Sternwirbler, 45s Homogenisierung, 60% Geschwindigkeit) betrachtet (Abbildung 4-14 a).

Auf die mit dem Stiftenwirbler gemischten Proben zeigt die Geschwindigkeit kaum Auswirkungen auf das Ausbreitmaß. Alle Ergebnisse liegen zwischen 45 und 62 cm (Abbildung 4-14 b).

Einen Vergleich der einzelnen Wirbler liefert Abbildung 4-15.

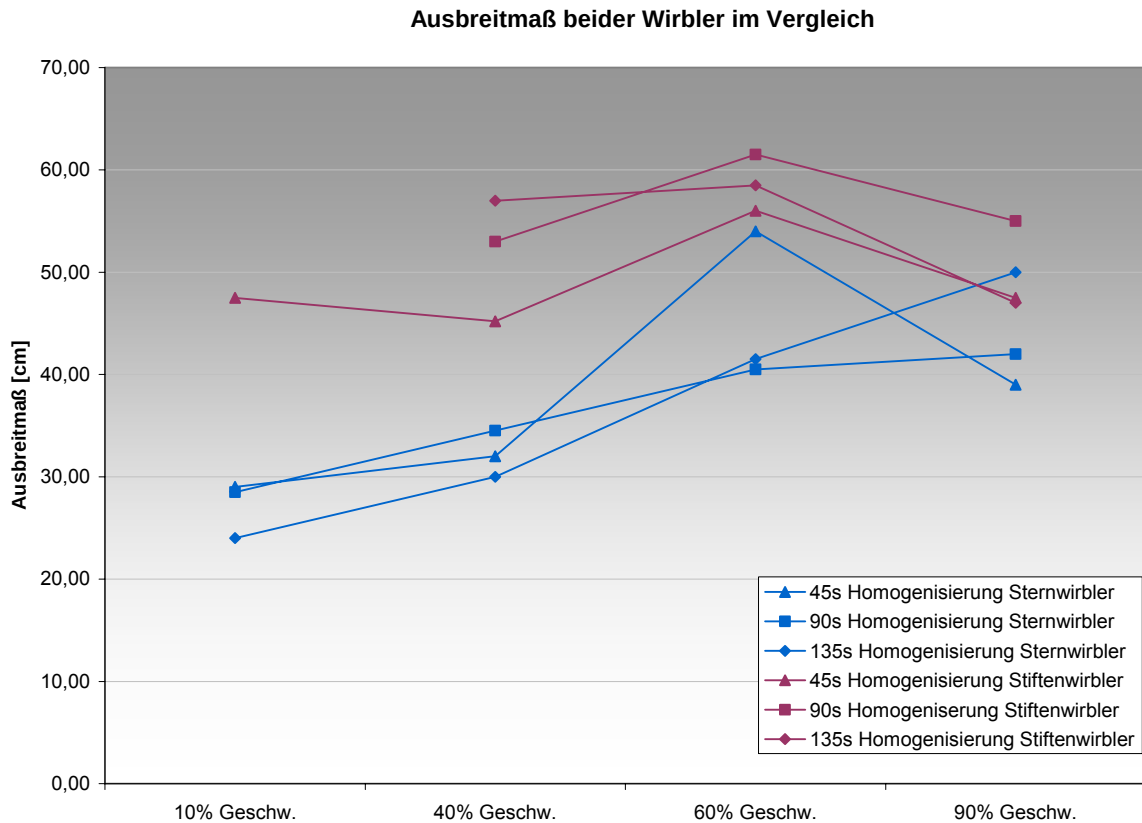


Abbildung 4-15: Ausbreitmaß: Vergleich beider Wirbler

Die Grafik zeigt, dass das Mischwerkzeug einen wesentlichen Einfluss auf die plastische Konsistenz von UHPC hat. Das Ausbreitmaß der Mischserie „Stiftenwirbler“ liegt bei fast allen Werten über jenen der Serie „Sternwirbler“.

Ausschlaggebend für eine plastische Konsistenz und somit einen gut verarbeitbaren Beton ist daher nicht wie anfangs vermutet hauptsächlich die Mischgeschwindigkeit, sondern auch die Art des Mischwerkzeugs.

4.4 Festigkeitsversuche

Die wohl wichtigste Eigenschaft des festen Betons ist die Druckfestigkeit. Sie nimmt mit dem Alter des Betons zu. Um den Erhärtungsverlauf zu zeigen, wurde sie gleich nach einem Tag, nach 7 und nach 28 Tagen geprüft.

Weiters wurde die Biegezugfestigkeit an 28 Tage alten Prismen geprüft.

Um eine Aussage über die Betonstruktur machen zu können, wurde die Porosität ausgewählter Proben mittels Quecksilberporosimetrie bestimmt. Die Auswertung

dieser Prüfung liefert Aussagen über die Porenverteilung, den mittleren Porenradius und die Gesamtporosität.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass im Rahmen dieser Arbeit folgende Festbetonprüfungen durchgeführt wurden:

- Druckfestigkeit f_c an Würfeln nach 1d, 7d und 28d,
- Biegezugfestigkeit f_{ct} an Prismen nach 28d,
- Porosität mittels Quecksilberporosimetrie.

4.4.1 Probekörperherstellung und Lagerung

Wie geplant wurden pro Mischung drei Würfel mit den Abmessungen 10x10x10 cm und ein Prisma mit 10x10x40 cm hergestellt. Die Schalungen der Würfel waren aus Stahl, der der Prismen aus Holz, jeweils zu 3 Stück zusammengefasst. Siehe Abbildung 4-16.



Abbildung 4-16: Schalungen für Würfel 100x100x100 mm und Prismen 100x100x400 mm

Die Schalungen wurden mit Schalungsöl eingestrichen, danach mit Beton gefüllt und am Rütteltisch verdichtet. Um einseitiges Austrocknen zu verhindern, wurden die fertigen Probekörper mit einer Folie abgedeckt, bevor sie nach einem Tag

ausgeschalt wurden. Die weitere Lagerung erfolgte 7 Tage im Wasserbad (Abbildung 4-17) und danach an der Luft.

Die Würfel, die bereits nach einem Tag zu prüfen waren, wurden nicht ins Wasserbad gelegt. Bei den Probekörpern, an denen die 7-Tages-Festigkeit bestimmt wurde, galt es zu beachten, dass sie mindestens eine halbe Stunde vor der Prüfung aus dem Wasser genommen wurden, um zu trocknen.

Anders als die Norm vorschreibt, wurden die Prismen nicht bis zur Prüfung im Wasserbad gelagert, sondern aus Platzgründen ebenfalls nach 7 Tagen herausgenommen und weiter bei Raumluft gelagert.



Abbildung 4-17: Probekörperlagerung im Wasserbad

4.4.2 Druckfestigkeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die einaxiale Druckfestigkeit an Würfeln mit Kantenlänge 100 mm geprüft. Die Versuche wurden an der laboreigenen Prüfmaschine der Firma *TONI Technik* (Modell 2040, Baujahr 1997, max. Prüflast 3000kN) durchgeführt. Geprüft wurde nach ÖNORM B 3303.

4.4.2.1 Prüfverfahren

Die Probekörper werden in eine Prüfmaschine zwischen zwei Druckplatten gesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die abgezogene Seite des Probekörpers seitlich befindet. Wird die Maschine gestartet, so bringt sie eine Prüflast mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,06 N/mm²·s auf. Der Probekörper wird bis zum Bruch belastet. Aus der erreichten Höchstlast errechnet sich die Druckfestigkeit wie folgt:

$$f_c = \frac{F}{A_f}$$

Formel 4-3: Druckfestigkeit [42]

mit F als Höchstkraft beim Bruch und A_f als Fläche des Probenquerschnitts.

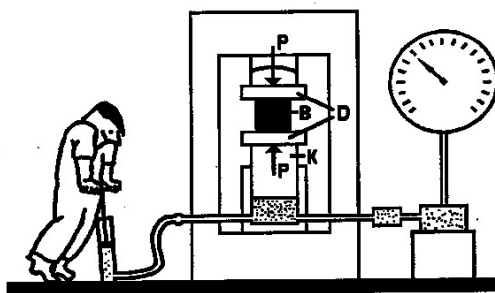


Abbildung 4-18: Prüfmaschine Druckfestigkeit [40]

4.4.2.2 Ergebnisse

Es bestätigt sich auch bei den Druckfestigkeiten, dass die Mischungen des Stiftenwirlers die besseren Ergebnisse liefern. Sowohl bei den 1-Tages-Festigkeiten, als auch bei den 7-Tages- und 28-Tages-Festigkeiten liegt der Durchschnitt der Werte des Stiftenwirlers immer höher als der des Sternwirlers. In Tabelle 4-2, Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 wird ein Überblick über alle Ergebnisse gegeben.

Tabelle 4-2: Mittelwerte Druckfestigkeiten

	1-Tages-Festigkeit	7-Tages-Festigkeit	28-Tages-Festigkeit
Mittelwert Druckfestigkeit Sternwirbler [N/mm ²]	60,90	112,36	147,23
Mittelwert Druckfestigkeit Stiftenwirbler [N/mm ²]	64,27	114,74	149,15
Streuung Druckfestigkeit Sternwirbler [N/mm ²]	8,57	7,12	8,63
Streuung Druckfestigkeit Stiftenwirbler [N/mm ²]	8,18	8,45	6,57

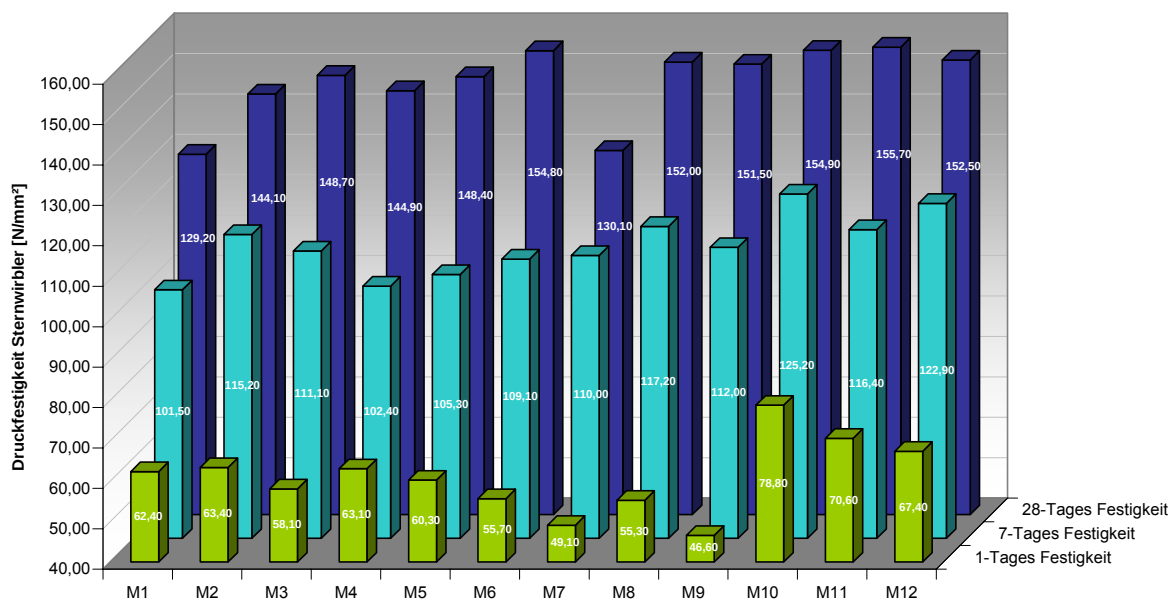


Abbildung 4-19: Ergebnisse Druckfestigkeit des UHPC hergestellt im Wirblermischer mit Sternwirbler-Mischwerkzeug

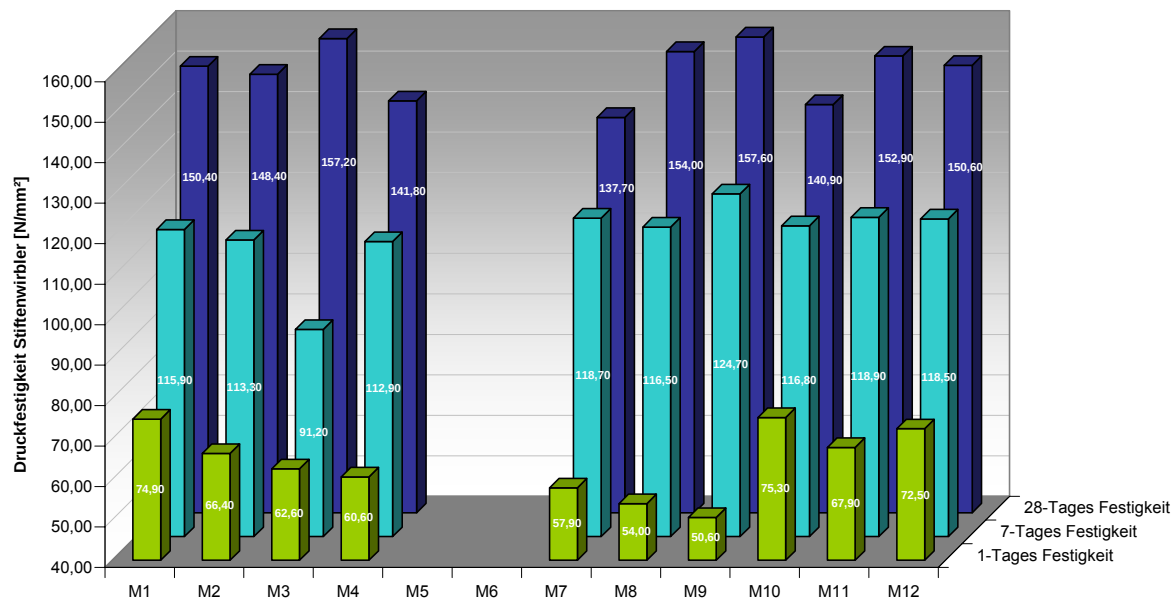
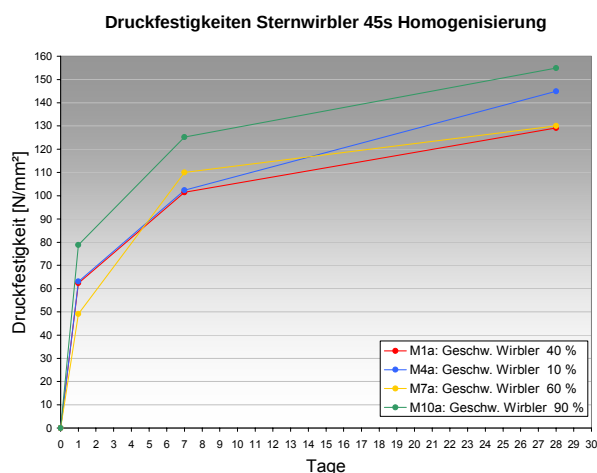


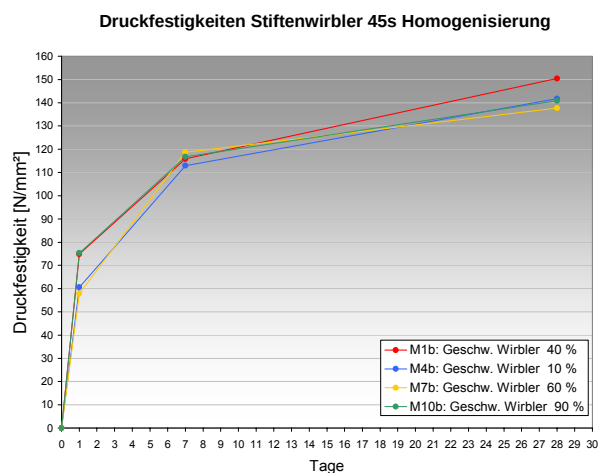
Abbildung 4-20: Ergebnisse Druckfestigkeit des UHPC hergestellt in Wirblermischer mit Stiftenwirbler-Mischwerkzeug

Um nun eine Aussage über den Einfluss der Dauer der Homogenisierung, der Wirblergeschwindigkeit oder des Mischwerkzeuges machen zu können, werden im Folgenden die Ergebnisse grafisch getrennt dargestellt.

In Abbildung 4-21 sind die einzelnen Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Zeit bei jeweils gleicher Homogenisierungsdauer dargestellt.



(a)



(b)

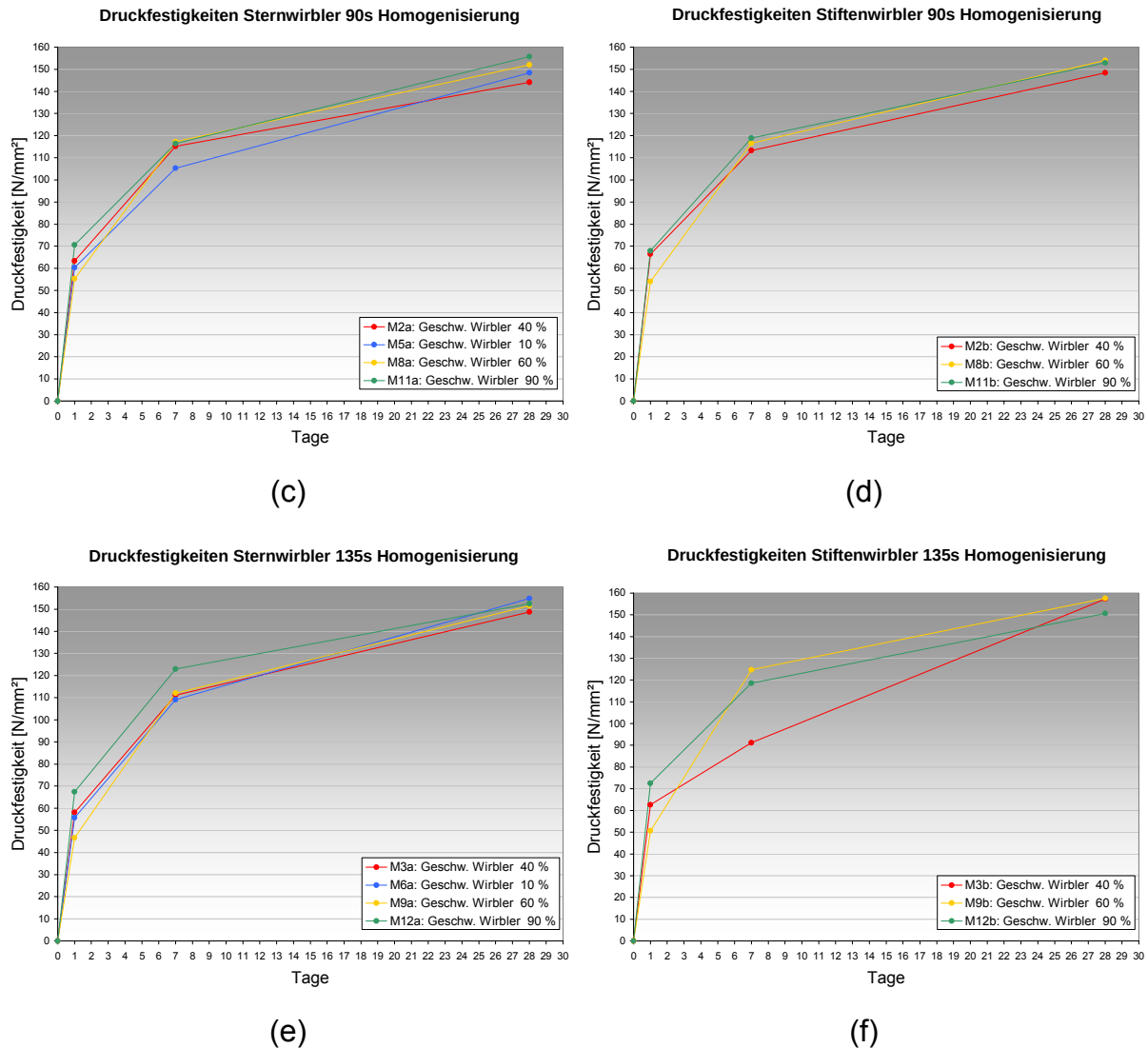


Abbildung 4-21: Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zeit bei jeweils gleicher Homogenisierungsdauer

- ad (a): Mischung M7a (60 % Wirblergeschwindigkeit) hat die geringste 1-Tages-Festigkeit, aber fast die höchste 7-Tages-Festigkeit. Eine höhere hat nur Mischung M10a (90 % Wirblergeschwindigkeit), die gleichzeitig auch den höchsten Festigkeitsverlauf aufweist.
- ad (b): Mischung M7b (60 % Wirblergeschwindigkeit) hat ebenfalls die geringste 1-Tages-Festigkeit und auch die höchste 7-Tages-Festigkeit. Mischung M10b (90 % Wirblergeschwindigkeit) hat im Vergleich zu M10a keineswegs die höchsten Festigkeiten.
- ad (c): Auch Mischung M8a (60 % Wirblergeschwindigkeit) weist genauso wie M7b die geringste 1-Tages-Festigkeit und die höchste 7-Tages-Festigkeit auf. Mischung 11a (90 % Wirblergeschwindigkeit) hat fast immer die höchste

Festigkeit. Nur M8a hat eine höhere 7-Tages-Festigkeit, die sich allerdings um nur 0,8 N/mm² von a M11a unterscheidet.

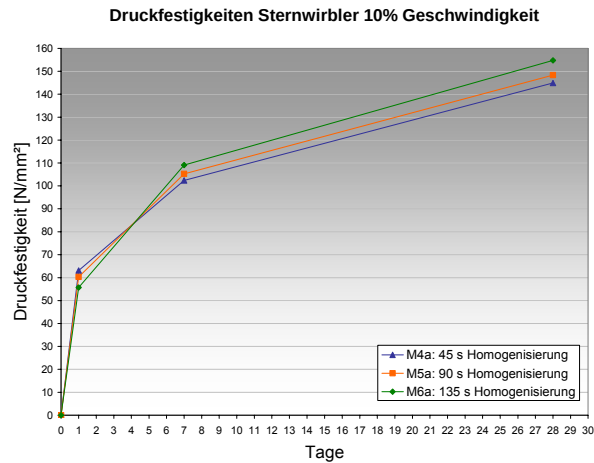
- ad (d): M8b (60 % Wirblergeschwindigkeit) hat die geringste 1-Tages-Festigkeit und fast die höchste 7-Tages-Festigkeit. Nur M11b (90 % Wirblergeschwindigkeit) weist eine höhere 7-Tages-Festigkeit auf. Mischung M11b hat auch gleichzeitig fast immer die höchste Festigkeit, allerdings ist die 28-Tages-Festigkeit von M8b gering höher als die von M11b.
- ad (e): Ebenso wie M8b weist M9a (60 % Wirblergeschwindigkeit) die geringste 1-Tages-Festigkeit und fast die höchste 7-Tages-Festigkeit auf. Ein höheres Ergebnis der 7-Tages-Festigkeit liefert nur M12a (90 % Wirblergeschwindigkeit). M12a hat außerdem fast immer die höchste Festigkeit, mit Ausnahme der höheren 28-Tages-Festigkeit von M6a.
- ad(f): In diesem Bild streuen die einzelnen Werte sehr stark verglichen zu anderen Bildern. Mischung M9b (60 % Wirblergeschwindigkeit) hat sowohl die höchste 1-Tages-Festigkeit als auch die höchste 7-Tages-Festigkeit. Die Festigkeitszunahme von 74,10 N/mm² in 7 Tagen in die höchste unter allen Mischungen. Dass die Mischung mit der höchsten Geschwindigkeit (M12b, 90 % Wirblergeschwindigkeit) so wie in vielen anderen Fällen die höchsten Festigkeiten liefert, trifft hier überhaupt nicht zu.

Tabelle 4-3: Übersicht der Interpretation von Abbildung 4-21

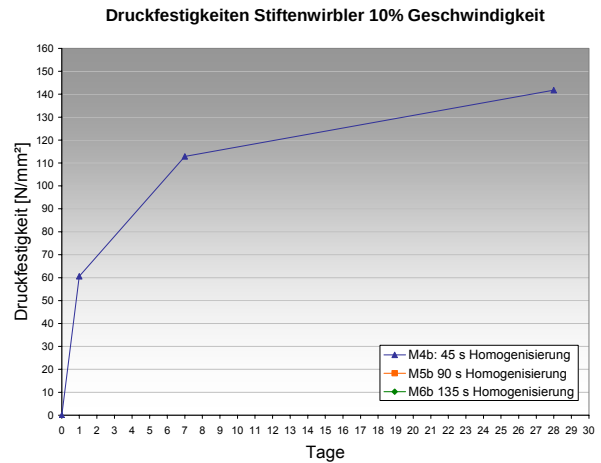
	Geschw. Wirbler: 60%	Geschw. Wirbler: 60%	Geschw. Wirbler: 90%	Geschw. Wirbler: 90%	Geschw. Wirbler: 90%
	min f_c 1d und max f_c 7d	min f_c 1d und fast max f_c 7d	max f_c 1d, 7d und 28d	fast max f_c 1d, 7d und 28d	max f_c 1d, 7d und 28d trifft nicht zu
(a) ¹		✓	✓		
(b) ²	✓				✓
(c) ¹	✓			✓	
(d) ²		✓	✓		
(e) ¹		✓		✓	
(f) ²	✓				✓

1) Sternwirbler 2) Stiffenwirbler

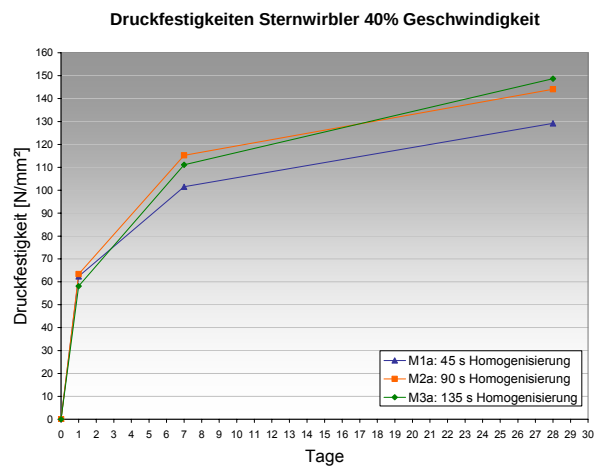
In Abbildung 4-22 sind die einzelnen Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Zeit bei jeweils gleicher Wirblergeschwindigkeit dargestellt.



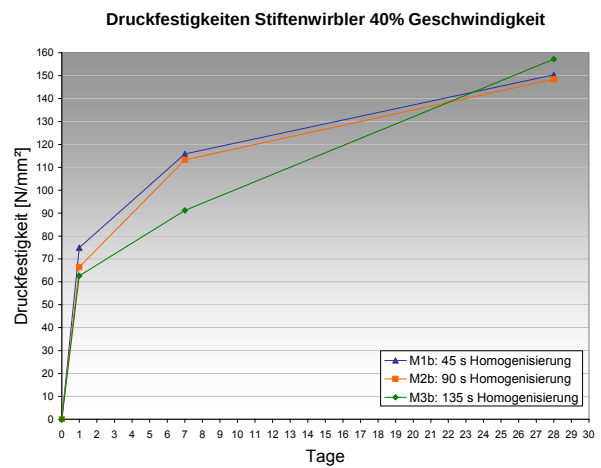
(a)



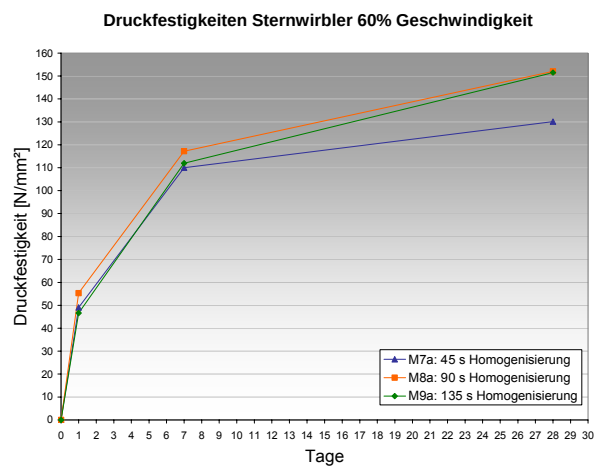
(b)



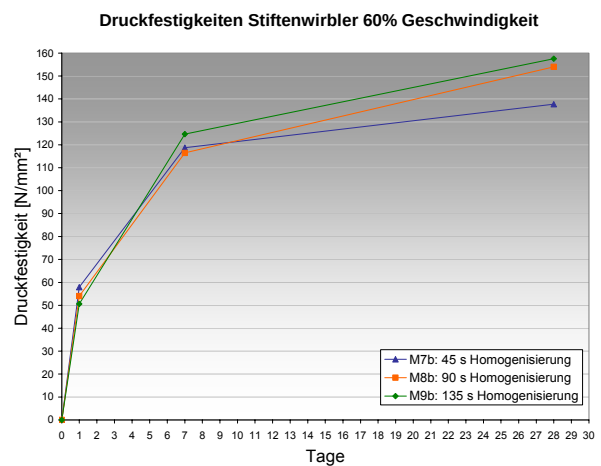
(c)



(d)



(e)



(f)

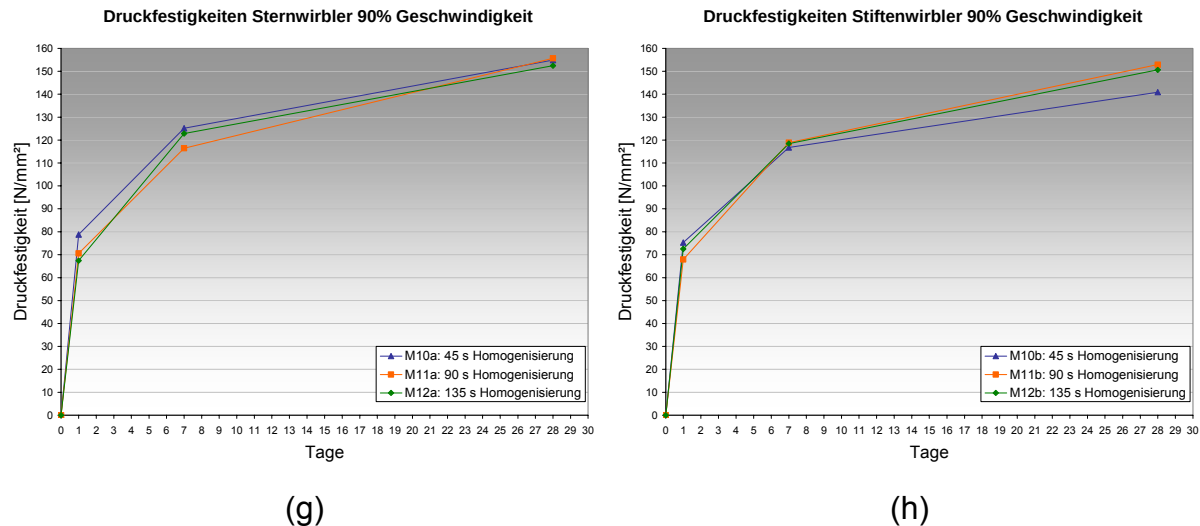


Abbildung 4-22: Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zeit bei jeweils gleicher Geschwindigkeit

- ad(a) Alle Mischungen erreichen mit länger andauernder Homogenisierung auch höhere Festigkeiten.
- ad (b) Es liegt nur von Mischung M4b (Stiftenwirbler, 45 s Homogenisierung, 10 % Wirblergeschwindigkeit) ein Ergebnis vor. Die anderen beiden Mischungen konnten aufgrund der zu geringen Geschwindigkeit nicht hergestellt werden.
- ad (c) M1a erreicht mit nur 45 s Homogenisierungszeit auch geringere Festigkeiten als die Mischungen M2a (90 s Homogenisierung) und M3a (135 s Homogenisierung).
- ad (d) In dieser Grafik ist auffallend, dass Mischung M3b (Stiftenwirbler, 135 s Homogenisierung, 40 % Wirblergeschwindigkeit) eine weitaus geringere 7-Tages-Festigkeit als die anderen beiden Mischungen (M1b und M2b) hat. Trotzdem ist die Endfestigkeit entsprechend der langen Homogenisierungsdauer die Höchste.
- ad (e) Auch bei einer Geschwindigkeit von 60 % zeigt sich, dass eine längere Homogenisierungszeit einen positiven Einfluss auf die Endfestigkeit hat.
- ad (f) Bei Mischgeschwindigkeiten von 60 % (das entspricht 8,28 m/s) sind keine Unterschiede zwischen dem Stern- und dem Stiftenwirbler bemerkbar. Die Festigkeit steigt mit zunehmender Dauer der Homogenisierung. (vgl. dazu Abbildung 4-22 e).
- ad (g) Die Dauer der Homogenisierung hat bei einer Wirblergeschwindigkeit von 90 % kaum Auswirkung auf die Druckfestigkeit.

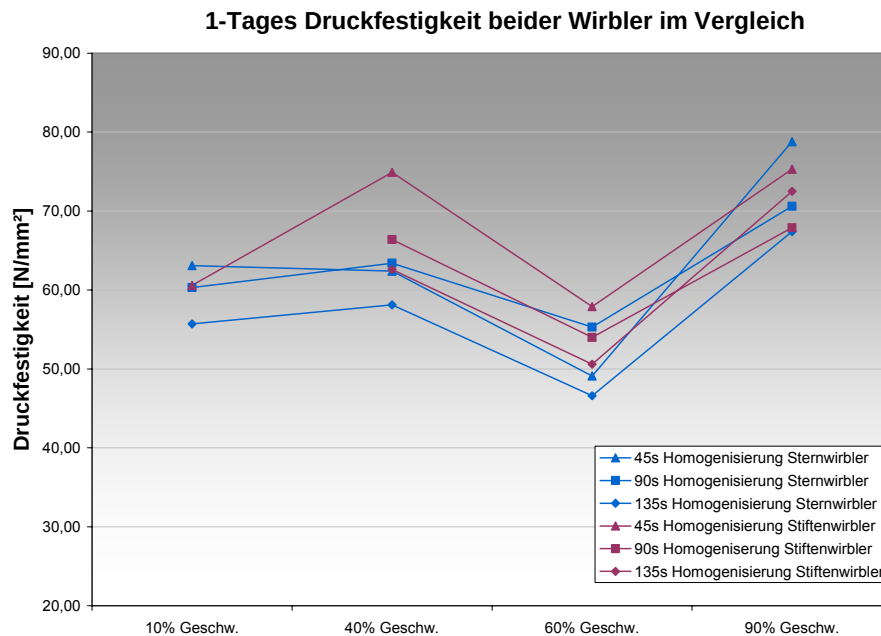
ad (h) Bei der Mischungsherstellung mit dem Stiftenwirbler und einer Mischgeschwindigkeit von 90 % bestätigt sich der Trend, dass eine längere Homogenisierungsdauer zu höheren Festigkeiten führt.

Tabelle 4-4: Übersicht der Interpretation von Abbildung 4-22

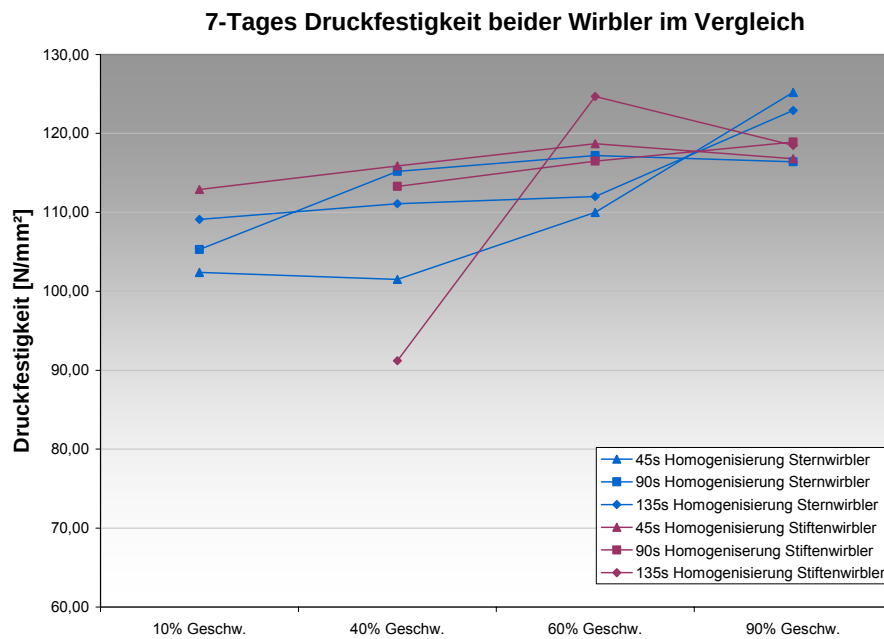
	Geschwindigkeit	$\sigma_{45s} < \sigma_{90s} < \sigma_{135s}$ 7-Tages-Festigkeit	$\sigma_{45s} < \sigma_{90s} < \sigma_{135s}$ 28-Tages-Festigkeit	$\sigma_{\max}$ 28d mit 135s Homogenisierung
(a) ¹	10%	✓	✓	✓
(b) ²	10%			
(c) ¹	40%		✓	✓
(d) ²	40%			✓
(e) ¹	60%			
(f) ²	60%		✓	✓
(g) ¹	90%			
(h) ²	90%			

1) Sternwirbler 2) Stiftenwirbler

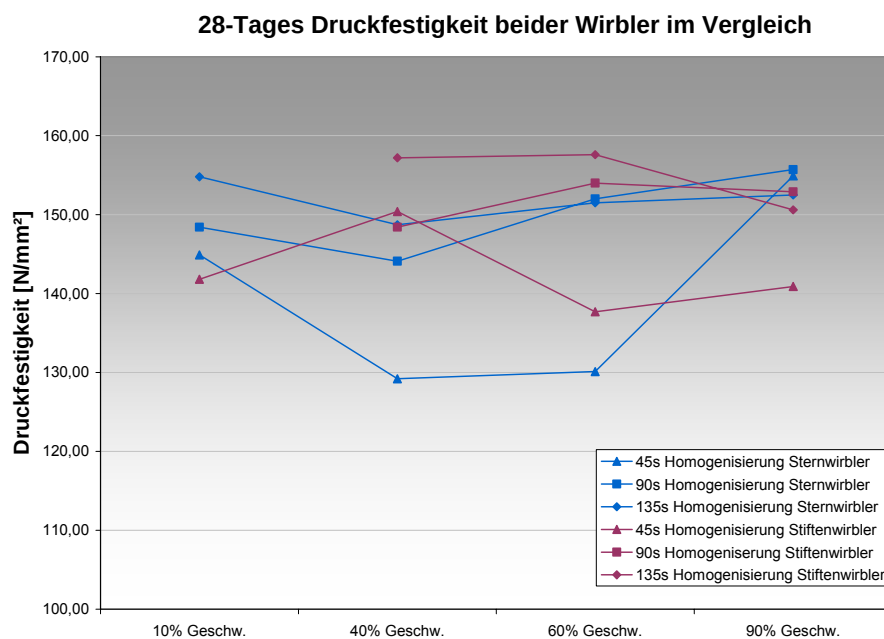
In Abbildung 4-23 sind die 1-Tages-, 7-Tages- und 28-Tages-Druckfestigkeit im Vergleich der beiden Mischwerkzeuge dargestellt.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4-23: Druckfestigkeiten nach 1d, 7d und 28d: Vergleich beider Wirbler

Auffallend bei der 1-Tages-Druckfestigkeit ist (Abbildung 4-23 a), dass ausnahmslos alle Mischungen mit 60 % Geschwindigkeit eine niedrigere Festigkeit, als jene mit 40 % Geschwindigkeit erreichen. Die höchsten Festigkeiten erreichen die

Mischungen mit der schnellsten Wirblergeschwindigkeit. In der Grafik ist kein Trend erkennbar, welches Mischwerkzeug zu höheren Druckfestigkeiten führt.

Betrachtet man die Grafik der 7-Tages-Druckfestigkeiten (Abbildung 4-23 b), so zeigt sich ein erster Trend. Die Festigkeit steigt mit zunehmender Mischgeschwindigkeit. Mischung M3b (Stiftenwirbler, 135 s Homogenisierung, 40 % Geschwindigkeit) ist dabei eine Ausnahme und passt nicht in diesen Trend hinein.

Die Grafik der 28-Tages-Druckfestigkeit (Abbildung 4-23 c) lässt viele Schlüsse zu. Einerseits zeigt sie, dass sich längere Homogenisierungszeiten günstiger auf eine hohe Druckfestigkeit auswirken. Andererseits sei aber auch gesagt, dass die höchste Mischgeschwindigkeit von 90 % nicht immer die besten Ergebnisse der Druckfestigkeit liefert. Vergleicht man den Stern- und den Stiftenwirbler untereinander, so zeigt sich, dass mit dem Stiftenwirbler höhere Festigkeiten erreicht wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine erstaunliche Festigkeitszunahme innerhalb der ersten 7 Tage aller Mischungen mit 60 % Wirblergeschwindigkeit vorliegt. Alle diese Mischungen haben die geringste 1-Tages-Festigkeit, drei die höchste und drei die fast die höchste 7-Tages-Festigkeit. Betrachtet man die Ergebnisse der Mischungen mit 90 % Wirblergeschwindigkeit, so bestätigt sich in den meisten Fällen, dass aus einer sehr hohen Geschwindigkeit eine hohe Druckfestigkeit resultiert.

Die höchste und die zweit höchste Druckfestigkeit aller Mischungen (sowohl die der Serie „Sternwirbler“, als auch der Serie „Stiftenwirbler“) erreichen die Mischungen M9b und M3b. Beide wurden mit dem Stiftenwirbler gemischt und 135 s lang homogenisiert. Die höchsten Druckfestigkeiten der Mischserie „Sternwirbler“ erreichen die Mischungen M11a und M10a. Diese wurden jeweils mit 90 % Wirblergeschwindigkeit gemischt (siehe dazu Abbildung 4-24).

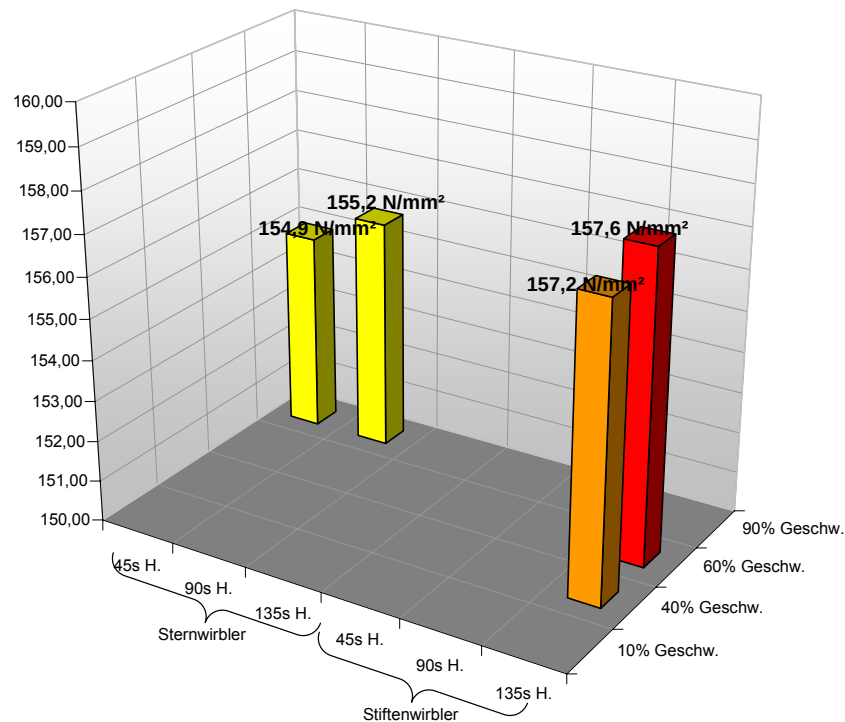


Abbildung 4-24: Darstellung der vier höchsten Druckfestigkeiten

Es werden nun einzelne Ergebnisse im Detail betrachtet:

Mit dem Ergebnis von Mischung M9b wurde die höchste 28-Tages-Festigkeit von 157,60 N/mm² erreicht. Abbildung 4-25 (a) zeigt den Probekörper in der Maschine vor dem Belastungstest und (b) danach. In Abbildung 4-25 (c) und (d) ist deutlich erkennbar, dass nur die linke Ecke abgebrochen ist und ansonsten kaum äußerlich sichtbare Risse beim Bruch aufgetreten sind.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4-25: Prüfung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen von M9b

Wieso M9b so hohe Festigkeiten erreicht hat, ist möglicherweise durch den geringen Luftgehalt erklärbar. Dieser liegt weit unter dem Durchschnitt und ist mit 5,70 % der zweit niedrigste. Niedriger ist nur jener von Mischung M8b mit 4,8 %. Auffallend ist, dass M8b mit 61,50 cm das höchste Ausbreitmaß hat, M9b mit 58,50 cm das zweit höchste. Dieser Zusammenhang zwischen niedrigem Luftgehalt und hohem Ausbreitmaß ist zwar bei einigen Mischungen gegeben, doch kann er nicht generell bestätigt werden.

Fazit: Ausschlaggebend für eine hohe Festigkeit sind sowohl die Geschwindigkeit des Wirblers beim Mischvorgang, als auch der Luftgehalt des Frischbetons. Mischung M9b wurde zwar nicht mit der höchsten Geschwindigkeit von 90 %, sondern nur mit 60 % gemischt, aber erzielt trotzdem die höchsten Festigkeiten. Erklärbar ist dies durch den geringen Luftgehalt, der die langsamere Geschwindigkeit kompensiert.

Wie schon zuvor erwähnt hat Mischung M9b den höchsten Festigkeitsanstieg innerhalb der ersten 7 Tage. Die 1-Tages-Festigkeit mit 50,60 N/mm² ist die kleinste und die 7-Tages-Festigkeit mit 124,70 N/mm² die größte unter allen Mischungen mit dem Stiftenwirbler. In Abbildung 4-26 ist der Probekörper nach der 7-Tages-Druckfestigkeitsprüfung abgebildet. Die Bruchfigur des Würfels gleicht dem typischen Bruchbild laut ÖNORM B 3303 (siehe dazu Abbildung 2-22, Seite 45).



Abbildung 4-26: Prüfung der Druckfestigkeit nach 7 Tagen von M9b

Ein Beispiel für eine totale Zerstörung des Probekörpers beim Druckversuch zeigt Abbildung 4-27 (Mischung M2a mit 40 % Wirblergeschwindigkeit und 90 s Homogenisierung). Die weißen Flecken deuten darauf hin, dass das Quarzmehl nicht gut genug untergemischt wurde. Aufgrund des inhomogenen Gefüges hatte dieser Würfel eine weniger hohe Festigkeit erreicht. Zwar liegen sie nicht im untersten Bereich, doch die Endfestigkeit liegt unter dem Durchschnitt.



Abbildung 4-27: Prüfung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen von M2a

4.4.3 Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit erfolgte an Prismen mit den Abmessungen 100x100x400 mm. Sie wurden in der Prüfmaschine der Firma Zwick (Typ Z250, Güteklasse 1) nach ÖNORM B 3303 mit einer 3-Punkt-Belastung geprüft.

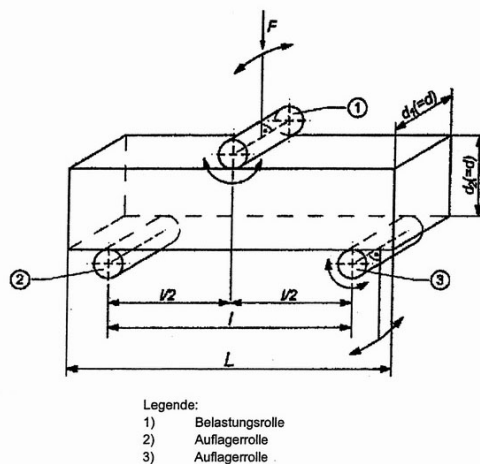
4.4.3.1 Prüfverfahren

Der prismenförmige Probekörper wird in der Prüfeinrichtung zwischen der oberen und den unteren Rollen platziert. Die abgezogene Fläche hat dabei nach vorne zu zeigen. Die Abmessungen und Abstände wie in Abbildung 4-28 (a) dargestellt, sind unbedingt einzuhalten. Die Lastaufbringung erfolgt mittig mit einer Vorkraft von 10 N und einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,06 N/mm²·s. Die Last ist bis zum Bruch des Probekörpers zu steigern. Aus der aufgezeichneten Höchstlast errechnet sich die Biegezugfestigkeit nach folgender Gleichung:

$$f_{ct} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

Formel 4-4: Biegezugfestigkeit [52]

Dabei ist F die Höchstlast, und l, d₁ und d₂ sind die in Abbildung 4-28 (a) angegebenen Abmessungen.



(a)



(b)

Abbildung 4-28: Schematische Darstellung der Biegezugprüfung (a) und Prüfmaschine (b) [52]

4.4.3.2 Ergebnisse

Betrachtet man den bisherigen Verlauf der Ergebnisse der Frischbetonprüfung und der Druckfestigkeit, so fällt auf, dass die Ergebnisse der Biegezugprüfung etwas aus der Reihe fallen. Sie sind in Abbildung 4-29 dargestellt.

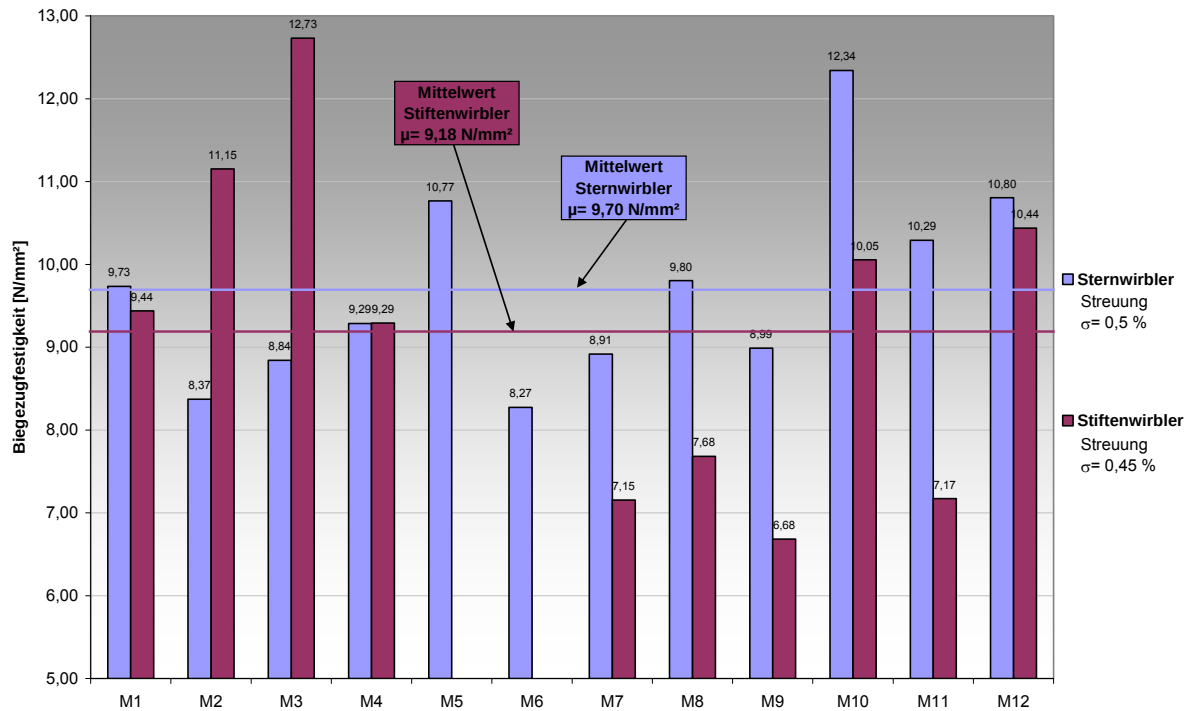


Abbildung 4-29: Ergebnisse der Biegezugprüfung

Der Mittelwert der Mischungen mit dem Sternwirbler liegt mit $9,70 \text{ N/mm}^2$ über dem Mittelwert der Mischungen mit dem Stiftenwirbler ($9,18 \text{ N/mm}^2$). Obwohl die höchste Biegezugfestigkeit bei Mischung M3b (Stiftenwirbler mit 40 % Geschwindigkeit, 135 s Homogenisierung) erzielt wurde, zeigen die Ergebnisse eindeutig, dass der Sternwirbler betreffend die Biegezugfestigkeit höhere Werte liefert (siehe dazu Abbildung 4-30).

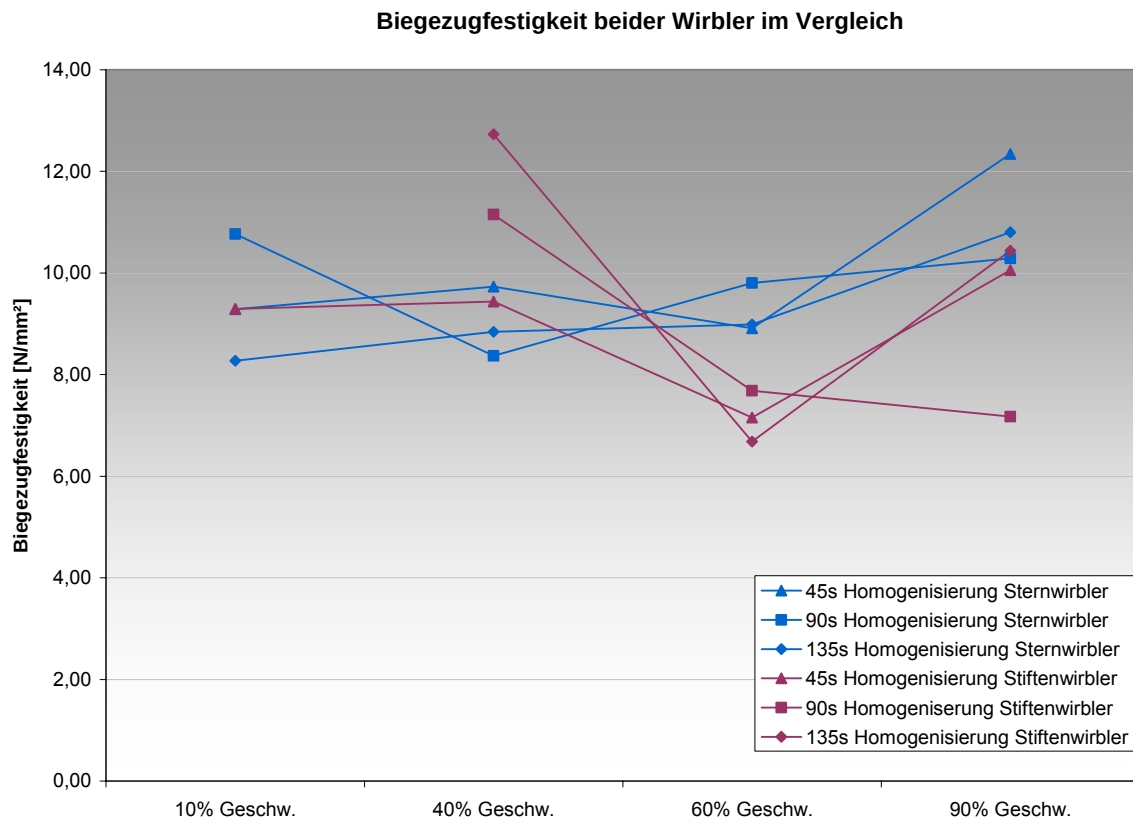


Abbildung 4-30: Biegezugfestigkeit beider Wirbler im Vergleich

In Abbildung 4-30 ist erkennbar, dass die Biegezugfestigkeiten der Mischungen, die mit 60 % Wirblergeschwindigkeit gemischt wurden, durchgehend niedriger sind, als die der Mischungen, die mit 90 % Geschwindigkeit hergestellt wurden. Bei einer Mischgeschwindigkeit von 40 % liefert der Stiftenwirbler bessere Ergebnisse, bei 90 % der Geschwindigkeit erreicht man mit dem Sternwirbler höhere Festigkeiten.

Die höchsten Werte der Biegezugfestigkeit der Serie „Sternwirbler“ sind bei jenen Proben vorzufinden, die mit 90 % Wirblergeschwindigkeit gemischt wurden (M10a: $f_{ct,max}=12,34 \text{ N/mm}^2$ und M12a: $f_{ct,max}=10,80 \text{ N/mm}^2$).

Die höchsten Werte der Stiftenwirbler-Mischungen sind die von M2b ($f_{ct}=11,15 \text{ N/mm}^2$, Wirblergeschwindigkeit 40 %, 90 s Homogenisierung) und M3b ($f_{ct}=12,73 \text{ N/mm}^2$, Wirblergeschwindigkeit 40 %, 135 s Homogenisierung). M3b erreicht mit $12,73 \text{ N/mm}^2$ die höchste Biegezugfestigkeit überhaupt.

Die Mischserie A (Sternwirbler) passt zum Schema der bisherigen Ergebnisse: mit der höchsten Mischgeschwindigkeit werden auch die besten Festigkeiten erreicht.

Mischserie B (Stiftenwirbler) hingegen passt überhaupt nicht in dieses Schema: die höchsten Festigkeiten liegen bei den Mischungen mit 40 % Wirblergeschwindigkeit und Mischung M9b, die die höchste Enddruckfestigkeit erreicht hat, versagt beim Biegezugversuch bei nur $6,68 \text{ N/mm}^2$.

Das ist der kleinste Wert unter allen Mischungen. Mögliche Ursachen sind eine schlechte Verdichtung beim Herstellen des Probekörpers, oder das schlechte Ergebnis ist auf das spröde Materialverhalten von UHPC zurückzuführen. Ersteres ist auszuschließen, da der zerstörte Probekörper eine saubere Bruchfläche fast ohne Lufteinschlüsse zeigt (siehe dazu Abbildung 4-32).



(a)



(b)

Abbildung 4-31: Probekörper M9b vor (a) und nach dem Biegezugversuch (b)



Abbildung 4-32: Bruchfläche des Probekörpers M9b nach dem Biegezugversuch

Es folgen einige weitere Probekörper im Detail:

Mischung M10a hat mit $12,34 \text{ N/mm}^2$ die zweithöchste Biegezugfestigkeit unter allen Mischungen und die höchste Biegezugfestigkeit unter den Mischungen mit dem

Sternwirbler erreicht. Das Bruchbild (Abbildung 4-33) zeigt eine glatte Fläche und kaum Lufteinschlüsse.



Abbildung 4-33: Probekörper M10a nach dem Biegezugversuch

Mischung M1a ist ein Beispiel für eine schlechte Homogenisierung. Die Mischung wurde nur 45 s lang homogenisiert und mit 40 % Wirblergeschwindigkeit gemischt. Dabei wurden die Feinanteile nicht gut genug untergemengt. Die Bruchfläche in Abbildung 4-34 zeigt einen großen blauen Fleck. Das ist Mikrosilica, das sich konzentriert in einem Bereich befindet, anstatt gleichmäßig untergemengt zu sein. Vermutlich ist der Probekörper auch deswegen an dieser Schwachstelle gebrochen.

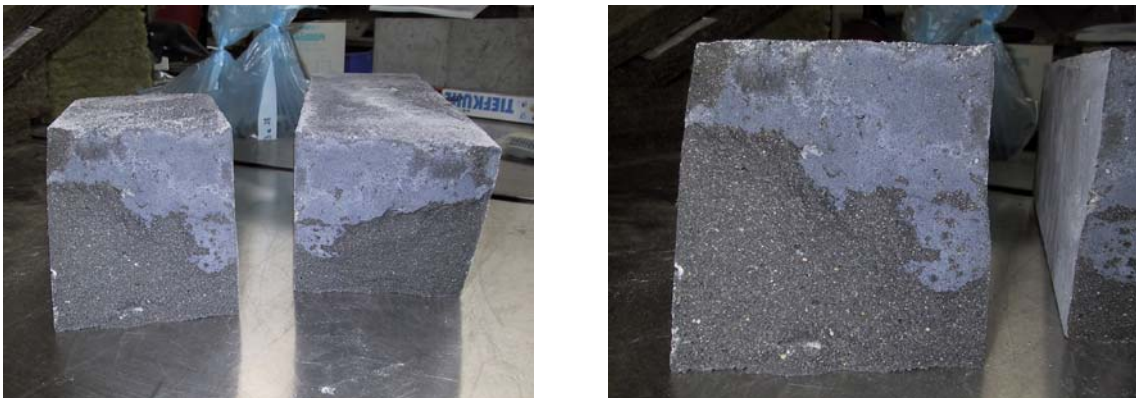


Abbildung 4-34: Probekörper M1a nach dem Biegezugversuch

Auf den folgenden zwei Seiten sind die Protokolle der Biegezugprüfung mit dem besten (M3b) und dem schlechtesten Ergebnis (M9b) von allen Mischungen abgebildet.

TU - Wien
 Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz
 Baustofflehrelabor
 Adolf-Blamauergasse 1-3
 A-1030 Wien

Tel.: +43/1/58801/20601
 Fax.: +43/1/58801/20697

Prüfprotokoll

Angaben:

Probenbezeichnung: Biegezug Serie B 3
 Prüfer : Kaber
 Parameter:

Prüfnorm : In Anlehnung an ÖNORM B3303

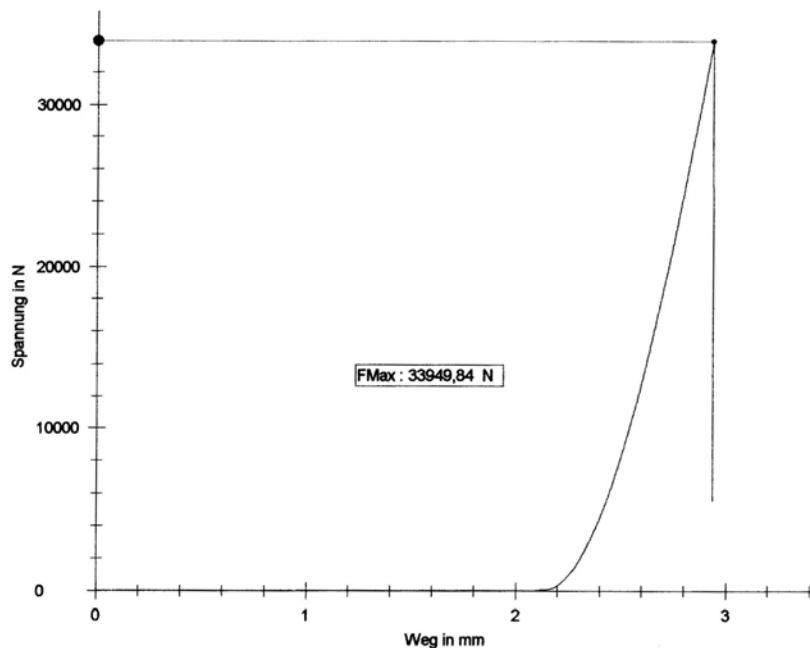
Vorkraft : 10 N
 Prüfgeschwindigkeit: 0,06 N/mm²s

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm ²	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	σ N/mm ²	FMax N	Datum	Uhrzeit
3	3	10000	100	100	12,73	33949,84	23.08.2005	09:33:50

Statistik:

n = 1	Probennummer	A mm ²	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	σ N/mm ²	FMax N
x	3	10000	100	100	12,73	33949,84
s	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-



Datum: 24. August 2005

Abbildung 4-35: Prüfprotokoll der Biegezugprüfung von M3b

TU - Wien
 Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz
 Baustofflehrelabor
 Adolf-Blamauergasse 1-3
 A-1030 Wien

Tel.: +43/1/58801/20601
 Fax.: +43/1/58801/20697

Prüfprotokoll

Angaben:

Probenbezeichnung: Biegezug Serie B
 Prüfer : Kaber
 Parameter:

Prüfnorm : In Anlehnung an ÖNORM B3303

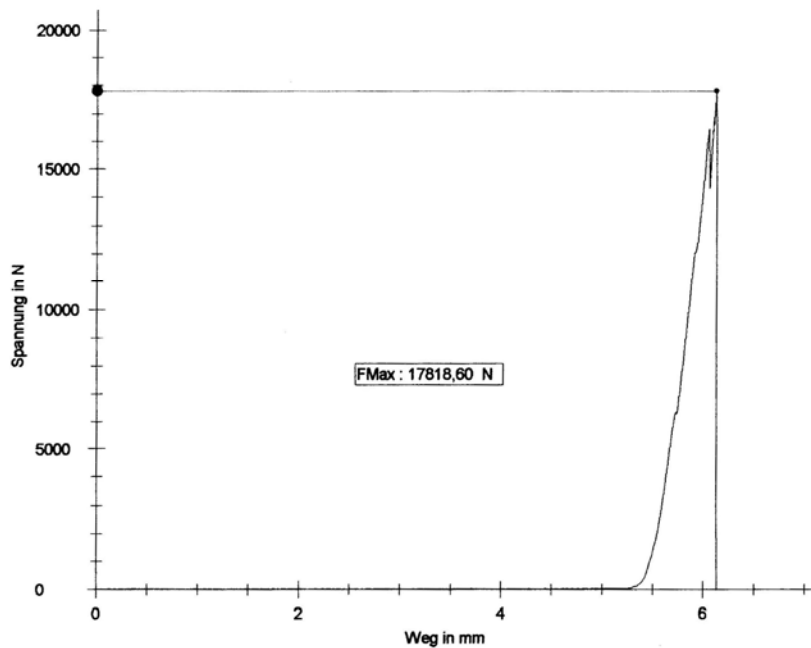
Vorkraft : 10 N
 Prüfgeschwindigkeit: 0,06 N/mm²s

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm ²	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	σ N/mm ²	FMax N	Datum	Uhrzeit
9	9	10000	100	100	6,68	17818,60	25.08.2005	10:03:59

Statistik:

n = 1	Probennummer	A mm ²	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	σ N/mm ²	FMax N
x	9	10000	100	100	6,68	17818,60
s	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-



Datum: 25. August 2005

Abbildung 4-36: Prüfprotokoll der Biegezugprüfung von M9b

4.4.4 Porosität

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an ausgewählten Mischungen die Porosität mittels der Quecksilberporosimetrie bestimmt (Abbildung 4-37). Durchgeführt wurde diese Bestimmung an den institutseigenen Porosimeter *PASCAL 140* (Niederdruckmessung) und *PASCAL 440* (Hochdruckmessung).

Die Materialproben stammen von den Würfeln, an denen die 28-Tages-Festigkeit geprüft wurde. Verwendet wurden die bei der Prüfung abgesplitterten Stücke des Probekörpers.



Abbildung 4-37: Quecksilberporosimeter *PASCAL 140* und *440*

Es wurden folgende Proben mit folgenden Begründungen untersucht:

- Mischung M10a (Sternwirbler 90 % Geschwindigkeit, 45 s Homogenisierung)
Begründung: M10a hat die größte Mischleistung sowie die höchste 1-Tages- und 7-Tages-Druckfestigkeit und die höchste Biegezugfestigkeit erreicht.
- Mischung M3b (Stiftenwirbler 40 % Geschwindigkeit, 135 s Homogenisierung)
Begründung: M3b ist auffällig im Druckfestigkeitsvergleich: Es wurde die niedrigste 7-Tages-Festigkeit und fast die höchste 28-Tages-Festigkeit erreicht, weiters hat M3b die höchste Biegezugfestigkeit.

- Mischung M9b (Stiftenwirbler 60 % Geschwindigkeit, 135 s Homogenisierung)
Begründung: Auch M9b ist auffällig im Druckfestigkeitsvergleich: Die Mischung erreicht die niedrigste 1-Tages-Festigkeit und die höchste 7-Tages- und 28-Tages-Festigkeit, sowie die kleinste Biegezugfestigkeit.

4.4.4.1 Prüfverfahren

Gewicht und Größe der Materialprobe mussten vorerst an die Größe des Dilatometers angepasst werden. Für optimale Messergebnisse sollte die Probe zwischen 1 g und 1,5 g wiegen, die Form ein wenig länglich sein und die Größe so angepasst, dass sich die Probe zwangsfrei im Dilatometer platzieren ließ.

Das Stück Materialprobe wurde abgewogen, ins Dilatometer gegeben und dieses mit einem eingefetteten Verschluss zugestöpselt und einer Verschraubung gesichert.

Siehe dazu Abbildung 4-38.



Abbildung 4-38: Materialprobe im Dilatometer

Danach wurde das Dilatometer im Porosimeter *PASCAL 140* platziert und mit der Evakuierung begonnen. Der Druck fällt bis ca. 0,2 kPa ab, danach beginnt die Quecksilberbefüllung. Nach der Befüllung kann die Analyse gestartet werden. Es wird Druck bis 140 MPa aufgebaut und anschließend wieder abgebaut. Nach ca. 40 min ist dieser Vorgang beendet und das Dilatometer kann ausgebaut werden.

Es wird, gefüllt mit Quecksilber und der Probe, abgewogen und ins Porosimeter *PASCAL 440* eingebaut. Dieses besteht aus einem mit Öl gefüllten Zylinder, in dem

das Dilatometer vorsichtig platziert wird. Bevor der zweite Vorgang gestartet werden kann, muss die Luft aus der Kapillare des Dilatometers entfernt werden, indem man sie bis zum Rand mit Öl auffüllt. Danach wird das Gefäß mit einer großen Überwurfmutter geschlossen. Siehe dazu Abbildung 4-39.



Abbildung 4-39: Dilatometer mit Probe und Quecksilber im PASCAL 440, Entfernung der Luft aus der Kapillare durch Befüllen mit Öl

Nun kann der Autoklave (Metallzylinder) mit Öl gefüllt und danach mit der Analyse begonnen werden. Es wird Druck bis 400 MPa aufgebaut und wieder abgebaut. Nach Beendigung des Vorgangs wird das Dilatometer ausgebaut, das restliche Öl entfernt und die Probe inklusive Quecksilber wird entsorgt.

Die Auswertung der Daten erfolgt über die Software.

4.4.4.2 Auswertung und Ergebnisse

Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse befindet sich in Tabelle 4-5.

Die Ergebnisse werden nur untereinander verglichen. Aufgrund der wenigen Messdaten wird keine Relation zur Literatur hergestellt, da ein Vergleich erst bei einer Anzahl von erheblich mehr Messdaten für sinnvoll erschien. Dieser Mehraufwand an Untersuchungen war nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Daher kann keine Aussage darüber gemacht werden, in wie fern die Werte mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen an UHPC übereinstimmen.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie

gewählte Mischungen	Masse Einwaage	Dichte Probe	Volumen	Gesamt-porenvolumen	Spezifische Poren-oberfläche	Mittlerer Porenradius	Gesamt Porosität	bulk density	apparent density
	[g]	[g/cm ³]	[mm ³]	[mm ³ /g]	[mm ² /g]	[Mikron]	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
Sternwirbler									
M10a	1,2617	2,306	447	14,9798	0,530	9,82642 *	3,4416	2,29748	2,37937
Stiftenwirbler									
M3b	1,2095	2,286	437	6,8623	0,997	0,002078	1,6227	2,36465	2,40365
M9b	1,5643	2,301	453	9,7168	2,897	0,002071	2,2961	2,36306	2,41859

*) Messfehler

Volumenmessung:

Das Volumen des eingedrungenen Quecksilbers ist ein direktes Maß des Porenvolumens der Probe [53]. Bei der Befüllung des Dilatometers mit Quecksilber dringt dieses, da es eine nicht benetzende Flüssigkeit ist, nicht in die Poren des Probekörpers ein. Erst unter Druck wird es hineingepresst. Über die sich unter Druck verkürzende Quecksilbersäule im Glasrohr des Dilatometers, kann die Menge des eingedrungenen Quecksilbers gemessen werden.

In das verwendete Dilatometer passen ca. 450 mm³ Quecksilber. Dieser Wert stimmt mit den Ergebnissen überein. Das Gesamtporenvolumen der Probe wird in mm³/g angegeben. Es ist bei Mischung M10a mit fast 15 mm³/g sehr hoch, bei den anderen beiden Mischungen niedriger, wobei M3b den niedrigsten Wert erreicht.

Spezifische Porenoberfläche:

Die Berechnung der spezifischen Oberfläche basiert auf dem Porenmodell der Zylinderporen. Die Mantelfläche für jede Porenklasse für Zylinderporen berechnet sich nach Formel 4-5.

$$A_i = \frac{2 \cdot V_i}{r_i}$$

Formel 4-5: Mantelfläche für Zylinderporen [53]

Die kumulative Porenoberfläche berechnet sich aus der Summe der Oberflächen aller Porenklassen [53].

M10a hat mit 0,53 mm²/g die kleinste Porenoberfläche, M3b mit 0,997 mm²/g die zweitgrößte und M9b mit 2,897 mm²/g die größte.

Mittlerer Porenradius

Der mittlere Porenradius berechnet sich wie folgt: Das bei der Analyse gemessene gesamte kumulative Porenvolumen wird betrachtet und davon werden 50 % berechnet. Aus der Kurve Porenvolumen gegen Porenradius wird der Radius berechnet, der 50 % des kumulativen Volumens entspricht [53].

Die mittleren Porenradien der Mischungen M3b und M10b liegen bei 0,0021 Mikron. Der von M10a ist um ca. $4,5 \cdot 10^3$ größer. Hierbei kann es sich nur um einen Messfehler handeln.

Gesamtporosität

Unter der Porosität versteht man das Verhältnis zwischen dem Porenvolumen und dem von der Probe eingenommenen externen Volumen. Sie wird in Prozent angegeben [53].

$$Porosität[\%] = \frac{100 \cdot V_{Poren} \cdot m_{Probe}}{V_{Probe}} \quad \text{Formel 4-6: Porosität [53]}$$

Bei allen untersuchten Proben liegt die Gesamtporosität unter 4 %. M3b weist mit 1,6 % die kleinste Porosität auf.

Bulk Density:

Unter dem Begriff Bulk Density versteht man die scheinbare Dichte durch Wägung der Probe und die Bestimmung des Volumens im Quecksilberporosimeter bei Vakuum. Dies ist die Dichte eines Feststoffes, bezogen auf das externe Volumen des Feststoffes [53].

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{Probe}}{V_{Probe}} = \rho_{Probe} \quad \text{Formel 4-7: Bulk Density [53]}$$

Das durchschnittliche Ergebnis liegt bei 2,34 g/cm³ und die einzelnen Werte weichen kaum davon ab.

Apparent Density:

Auch unter dem Begriff Apparent Density versteht man die scheinbare Dichte, die mit Hilfe von Quecksilber bestimmt wird. Allerdings entspricht ρ_{app} im Unterschied zu ρ_{bulk} , die unter Vakuum gemessen wird, der Dichtebestimmung unter hohem Druck. Man spricht aus folgendem Grund von einer scheinbaren und keiner wahren Dichte: Die Messung des Porenvolumens ist beendet, sobald der maximal aufbaubare Druck erreicht wird. Existieren nun Poren, die kleiner sind als jene, die mit dem Maximaldruck erreicht werden, so können diese nicht in die Dichteberechnung eingehen [53]. Die scheinbare Dichte berechnet sich wie folgt:

$$\rho_{app} = \frac{m_{Probe}}{V_{Probe} - V_{Poren} \cdot m_{Probe}}$$

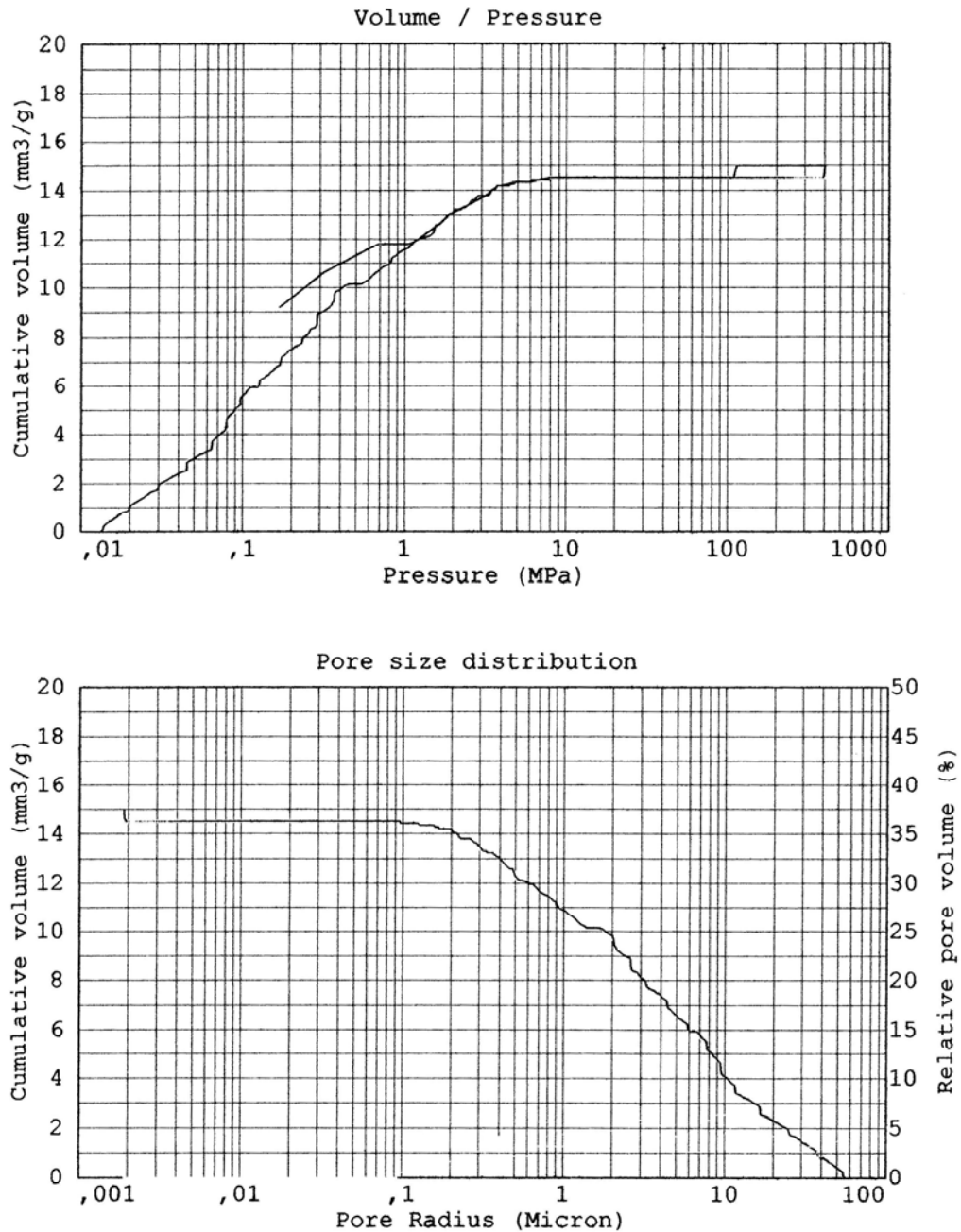
Formel 4-8: Apparent Density [53]

mit V_{Poren} als das spezifische Gesamtporenvolumen.

Ebenso wie bei den Ergebnissen der Bulk Density streuen auch die Werte der Apparent Density kaum. Die Apparent Density ist immer höher als die Bulk Density, da bei der Berechnung vom Volumen der Probe das Volumen der Poren abgezogen wird.

Graphische Darstellungen der untersuchten Proben:

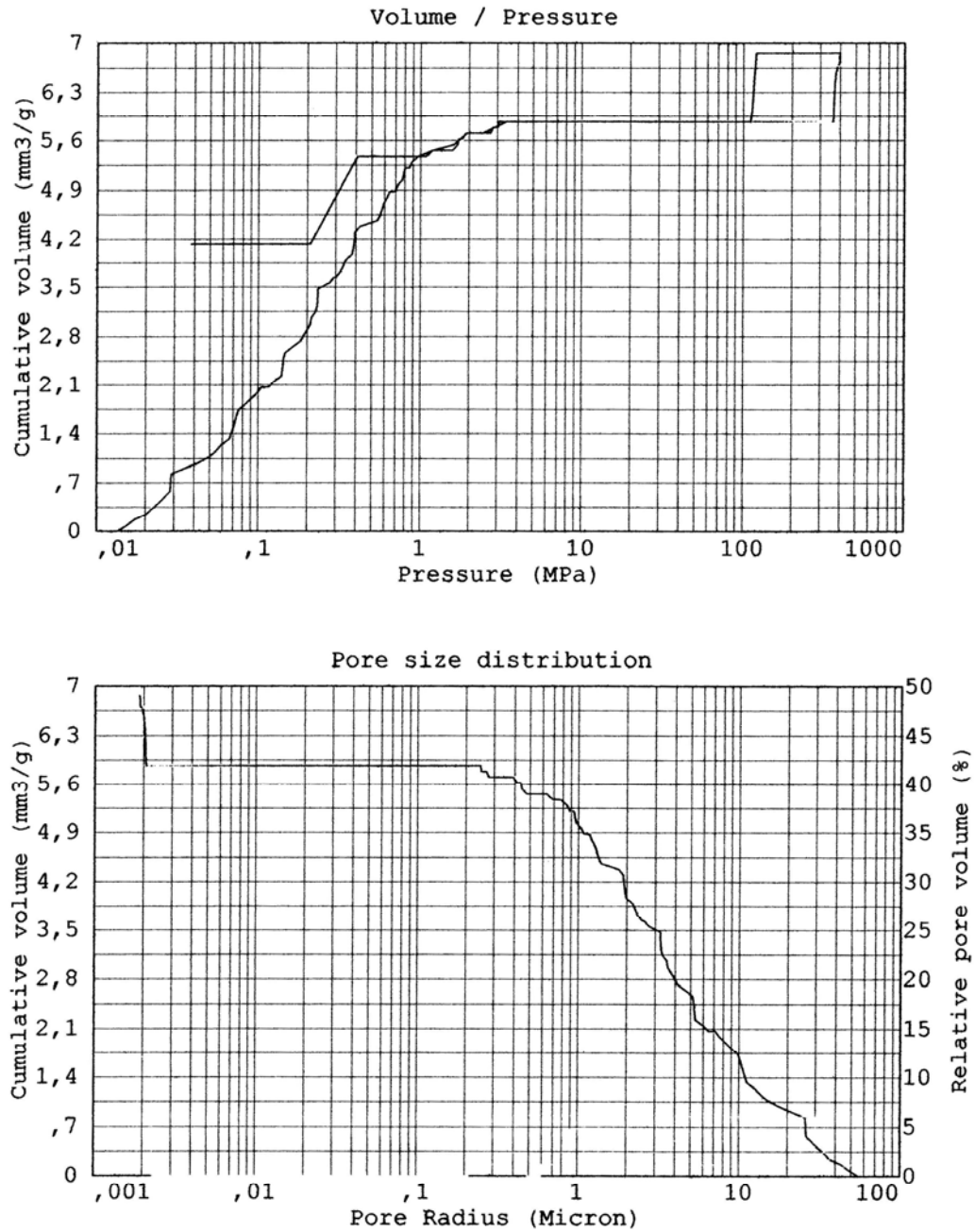
Die graphische Auswertung des Druckverlaufes sowie der Porenverteilung mit den entsprechenden Porenradien aller untersuchten Proben befinden sich auf den folgenden Seiten.



RESULTS

Total cumulative volume (mm³/g) : 14,9798
 Total specific surface area (m²/g) : ,53
 Average pore radius (Micron) : 9,826416
 Total porosity (%) : 3,4416
 Bulk density (g/cm³) : 2,29748
 Apparent density (g/cm³) : 2,37937

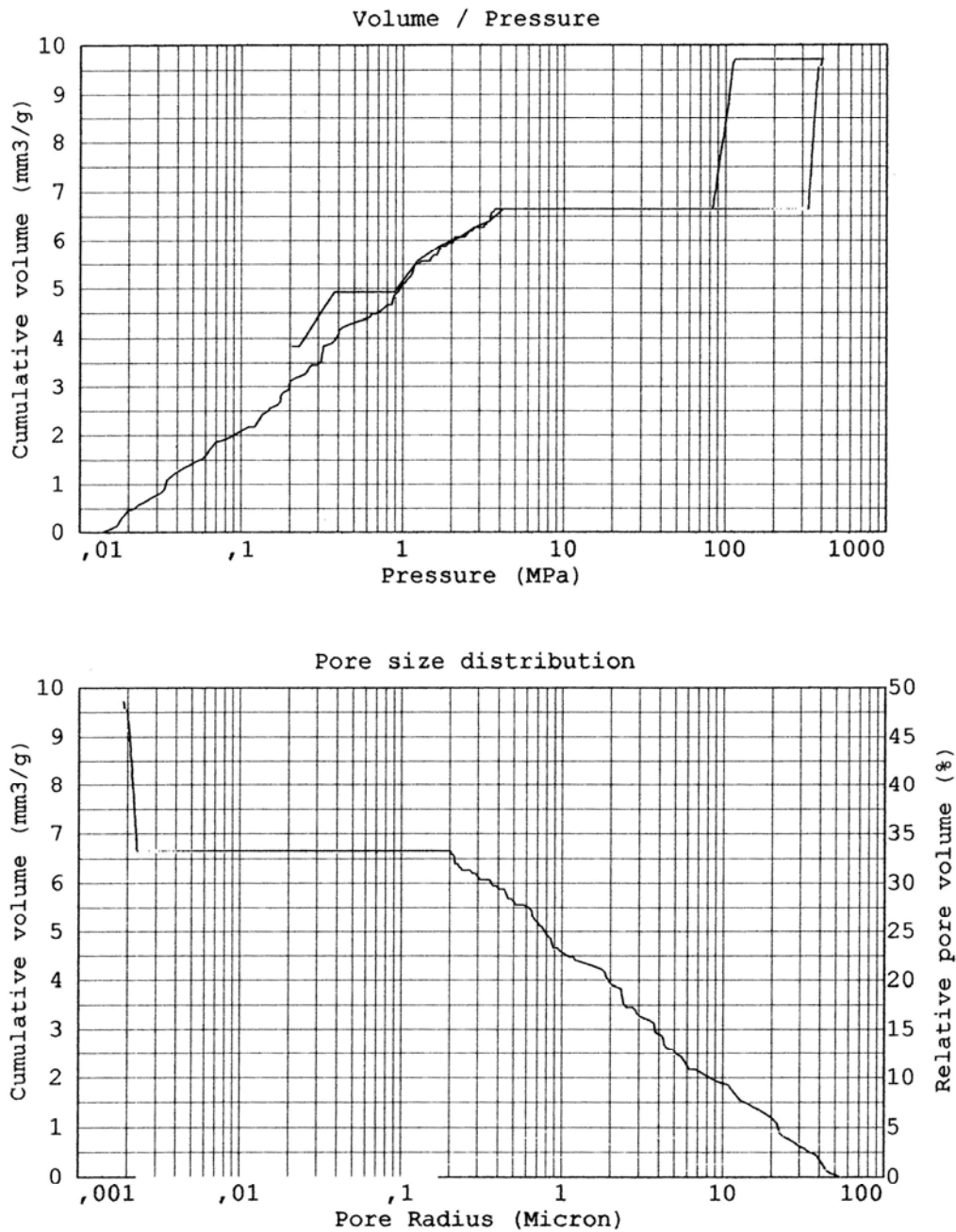
Abbildung 4-40: Druck- und Porenverteilung von M10a aus der Quecksilberporosimetrie



RESULTS

Total cumulative volume (mm³/g) : 6,8623
 Total specific surface area (m²/g) : ,997
 Average pore radius (Micron) : ,002078
 Total porosity (%) : 1,6227
 Bulk density (g/cm³) : 2,36465
 Apparent density (g/cm³) : 2,40365

Abbildung 4-41: Druck- und Porenverteilung von M3b aus der Quecksilberporosimetrie



RESULTS

Total cumulative volume (mm³/g) : 9,7168
 Total specific surface area (m²/g) : 2,897
 Average pore radius (Micron) : ,002071
 Total porosity (%) : 2,2961
 Bulk density (g/cm³) : 2,36306
 Apparent density (g/cm³) : 2,41859

Abbildung 4-42: Druck- und Porenverteilung von M9b aus der Quecksilberporosimetrie

4.5 Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse

An den im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Betonproben wurden zwei Frischbetonprüfungen und drei Festbetonprüfungen durchgeführt. Diese waren:

- Luftgehalt Frischbeton,
- Ausbreitmaß,
- Druckfestigkeit,
- Biegezugfestigkeit,
- Porosität.

Die Druckfestigkeit einer Probe wurde dreimal, nämlich nach einem, nach 7 und nach 28 Tagen geprüft. In der folgenden Zusammenstellung der Ergebnisse wird jedoch nur die 28-Tages-Festigkeit berücksichtigt. Die Erhärtungsverläufe sind ausführlich in Kapitel 4.4.2 beschrieben.

Die Biegezugfestigkeit wurde einmal an 28 Tage alten Prüfkörpern bestimmt.

Die Porosität geht in die Zusammenfassung nicht ein, da nur ausgewählte Proben untersucht wurden. Die Anzahl der Prüfungen war zu gering, um aussagekräftige Ergebnisse liefern zu können.

Tabelle 4-6 zeigt eine Aufstellung aller relevanten Ergebnisse. Die Werte sind jeweils für das Sternwirbler-Mischwerkzeug und für das Stiftenwirbler-Mischwerkzeug getrennt angegeben. Die besten Werte (aller Mischungen) sind rosa, die zweitbesten orange und die drittbesten gelb hervorgehoben.

Tabelle 4-6: Zusammenfassung der Ergebnisse

Sternwirbler	10% Geschwindigkeit			40% Geschwindigkeit			60 % Geschwindigkeit			90 % Geschwindigkeit		
	M4a	M5a	M6a	M1a	M2a	M3a	M7a	M8a	M9a	M10a	M11a	M12a
max Mischleistung [kW]	0,40	0,50	0,60	1,90	2,20	2,20	3,00	3,50	3,50	4,50	4,30	4,30
Mischarbeit [kWh]	0,061	0,075	0,054	0,283	0,298	0,307	0,310	0,406	0,380	0,507	0,487	0,461
Luftgehalt [%]	7,00	7,00	5,80	7,00	7,00	6,70	5,80	7,50	7,00	6,50	6,40	6,30
Ausbreitmaß [cm]	29,00	28,50	24,00	32,00	34,50	30,00	54,00	40,50	41,50	39,00	42,00	50,00
28d Druckfestigkeit [N/mm ²]	144,90	148,40	154,80	129,20	144,10	148,70	130,10	152,00	151,50	154,90	155,70	152,50
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	9,29	10,77	8,27	9,73	8,37	8,84	8,91	9,80	8,99	12,34	10,29	10,80

Stiftenwirbler	10% Geschwindigkeit			40% Geschwindigkeit			60 % Geschwindigkeit			90 % Geschwindigkeit		
	M4b	M5b	M6b	M1b	M2b	M3b	M7b	M8b	M9b	M10b	M11b	M12b
Mischleistung [kW]	1,30			5,10	4,60	5,00	7,00	6,50	6,70	7,30	10,60	8,30
Mischarbeit [kWh]	0,083			0,465	0,369	0,370	0,557	0,530	0,546	0,792	1,020	0,913
Luftgehalt [%]	6,60			7,00	6,00	6,80	6,50	4,80	5,70	7,10	6,20	6,90
Ausbreitmaß [cm]	47,50			45,20	53,00	57,00	56,00	61,50	58,50	47,50	55,00	47,00
28d Druckfestigkeit [N/mm ²]	141,80			150,40	148,40	157,20	137,70	154,00	157,60	140,90	152,90	150,60
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	9,29			9,44	11,15	12,73	7,15	7,68	6,68	10,05	7,17	10,44

Aus Tabelle 4-6 geht eindeutig hervor, dass die Mischungen mit dem Stiftenwirbler die besseren Ergebnisse liefern. Der niedrigste Luftgehalt aller Proben, das höchste Ausbreitmaß und die höchste Druck- und Biegezugfestigkeit wurden mit dem Stiftenwirbler erzielt. Die zweitbesten Ergebnisse, mit Ausnahme der Biegezugfestigkeit, liefert ebenso der Stiftenwirbler.

Die Mischleistung nimmt mit steigender Geschwindigkeit zu. Ein höherer Leistungsverbrauch bewirkt eine bessere Homogenität und somit höhere Festigkeiten. Doch viel wesentlicher als die Geschwindigkeit beeinflusst die Form des Mischwerkzeuges den Mischprozess. Aufgrund seiner Geometrie benötigt der Stiftenwirbler mehr also doppelt so viel Energie als der Sternwirbler. Die Folge der wesentlich höheren Mischarbeit sind bessere Ergebnisse, wie in Tabelle 4-6 bestätigt wird.

Auf den Luftgehalt im Frischbeton hingegen, haben weder die Mischgeschwindigkeit noch das Mischwerkzeug einen wesentlichen Einfluss. Allen Mischungen wurde ein Entschäumer beigemischt, der einem fälschlicherweise hohen Luftgehalt bei Mischungen mit hoher Geschwindigkeit entgegenwirken soll. Die Wirkung des Entschäumers bestätigt sich in den Ergebnissen.

Auch beim Ausbreitmaß zeigt sich, dass die Mischungen mit dem Stiftenwirbler besser homogenisiert sind und eine plastischere Konsistenz aufweisen, als jene mit dem Sternwirbler. Die Qualität und Verarbeitbarkeit des Betons wird daher wesentlich durch die Form des Mischwerkzeuges und nicht durch die Mischgeschwindigkeit beeinflusst.

Die höchste Druckfestigkeit mit $157,60 \text{ N/mm}^2$ erreicht Mischung M9b. Diese Probe wurde mit dem Stiftenwirbler 135 s homogenisiert und mit einer Wirblergeschwindigkeit von $8,28 \text{ m/s}$ (60 % der Höchstgeschwindigkeit) gemischt. Durchschnittlich sind die Druckfestigkeiten jener Mischungen, die mit dem Stiftenwirbler gemischt wurden, höher als die der Mischungen mit dem Sternwirbler. Ebenso bestätigt sich bei beiden Mischwerkzeugen, dass aus einer höheren Mischgeschwindigkeit eine höhere Druckfestigkeit resultiert.

Aus den Resultaten der Druckfestigkeit geht hervor, dass weder das Mischwerkzeug alleine, noch die Geschwindigkeit alleine eine Auswirkung auf die Ergebnisse haben. Eine abgestimmte Kombination zwischen Wirblergeschwindigkeit und Form des Mischwerkzeuges ist erforderlich, um eine optimale Homogenität des UHPC zu erreichen.

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit fallen etwas aus der Reihe. Die höchste mit $12,73 \text{ N/mm}^2$ wird zwar mit dem Stiftenwirbler erzielt, doch durchschnittlich betrachtet liefert der Sternwirbler die besseren Ergebnisse. Die UHPC-Mischung mit der höchsten Druckfestigkeit versagte beim Biegezugversuch bei nur $6,68 \text{ N/mm}^2$.

Die mögliche Ursache für die vergleichsweise schlechteren Ergebnisse der Biegezugprüfung von UHPC konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden.

4.6 Interpretation

Bei einem Mischvorgang sollen alle Ausgangsstoffe so miteinander vermengt werden, dass sie im Endprodukt gleichmäßig verteilt sind. Um die bestmögliche Homogenität zu erreichen, sind drei Faktoren von wesentlicher Bedeutung:

- Mischdauer
- Mischgeschwindigkeit
- Mischwerkzeug

Bei einem Mischer des Typs *Eirich* ist es möglich, die soeben genannten Einflussgrößen genau zu spezifizieren und somit den Mischvorgang zu kontrollieren.

Die Mischdauer ist entsprechend dem Mischer so zu wählen, dass eine ausreichende Durchmischung stattfinden kann. Wird zu wenig Mischarbeit eingetragen, können die Eigenschaften, die aufgrund der Zusammensetzung des Betons möglich wären, nicht erreicht werden [54]. Die Mischdauer ist dabei vom Gerät selbst und von der Betonart abhängig. Ultrahochfeste Betone müssen aufgrund ihrer Zusammensetzung wesentlich länger gemischt werden, als Normalbetone. Eine Übermischung allerdings hat zur Folge, dass die Qualität des Betons wieder abnimmt. Siehe dazu Abbildung 4-43.

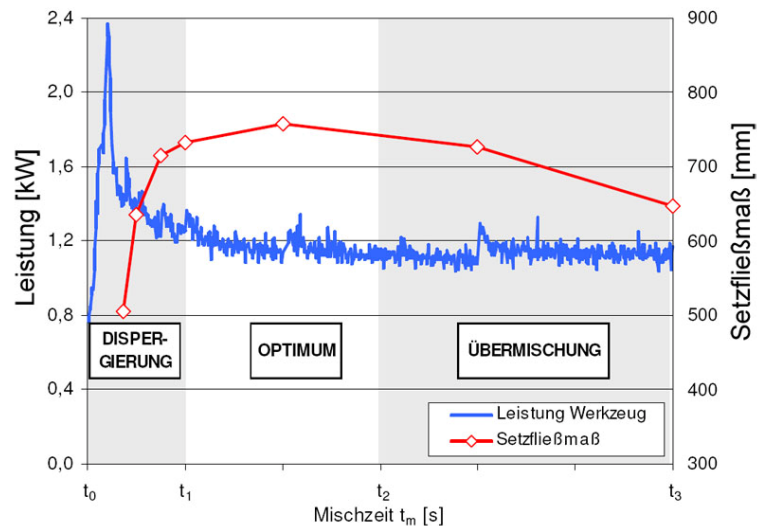


Abbildung 4-43: Einfluss der Mischdauer auf den Beton [54]

Ebenso wie die Mischdauer, ist die Mischgeschwindigkeit von der Art des Betons abhängig. Aus den Versuchen hat sich ergeben, dass mit steigender Geschwindigkeit, der Leistungseintrag in die Mischung steigt und somit eine bessere Homogenisierung möglich ist. Zu hohe Geschwindigkeiten haben allerdings auch einen raschen Temperaturanstieg im Mischgut zur Folge. Dies ist bei der Wahl der Geschwindigkeit zu beachten.

Fast alle Ergebnisse verdeutlichen, dass das Mischwerkzeug eine wesentliche Rolle beim Mischvorgang spielt. Aufgrund der Geometrie des Werkzeuges wird mehr oder weniger Leistung in die Mischung eingebracht und so die Homogenität des Betons beeinflusst.

Wesentlich bei allen Mischungen von UHPC ist die Zugabe eines Entschäumers. Nur so kann sichergestellt werden, dass die während des Mischvorgangs eingebrachte Luft die Festigkeit des Betons nicht negativ beeinflusst.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich unter den bei dieser Arbeit gegebenen Umständen folgende Parameter als optimal herausgestellt haben:

- Einsatz des Stiftenwirlers
- Homogenisierungszeit zwischen 90 s und 135 s, ergibt eine Gesamtmischdauer von rund 10 Minuten
- Topfgeschwindigkeit von 50 %, entspricht 1,1 m/s
- Wirblergeschwindigkeit von 60 % (der Maximalgeschwindigkeit der Mischmaschine), entspricht rund 8,30 m/s

Es wird empfohlen, für die Herstellung von Spezialbetonen einen Wirbel-Mischer, wie den der Fa. *Eirich*, zu verwenden. Die Eigenschaften, die aufgrund der Zusammensetzung der Betone möglich sind, können nur bei einer ausreichenden Homogenisierung des Mischgutes erreicht werden. Um den Mischvorgang zu steuern und eine gute Durchmischung zu erreichen, ist es notwendig, den Leistungseintrag zu kontrollieren. Dies wiederum ist z.B. bei einem Mischer des Typs *Eirich* möglich, da während des Mischvorganges kaum Reibung und Verschleiß am Gerät auftreten. Deswegen kann von der ins System eingebrachten Leistung direkt auf die für die Mischung notwendige Arbeit geschlossen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Resümee

Der Mischvorgang zur Herstellung von Beton wird in der ÖNORM B 3303 geregelt. Darin heißt es: „... Die Mischung muss in einem Labormischer so durchgeführt werden, dass eine homogene Mischung entsteht und keine Mischungsbestandteile verloren gehen...“. Um die Homogenität einer Mischung feststellen und in weiterer Folge überprüfen zu können, ist es notwendig, den in die Mischung eingebrachten Leistungs- bzw. Energieeintrag zu kennen.

Mit einem *Eirich*-Mischer ist nicht nur die Mischleistung feststellbar, sondern auch individuell regulierbar. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Labormischer besitzt folgende Besonderheiten:

- zwei unterschiedliche Mischwerkzeuge standen zur Verfügung,
- die Zeit und die Geschwindigkeit des Mischvorganges waren regulierbar,
- der Drehsinn von Topf und Wirbler war veränderbar.

Der Mischvorgang wurde mit einer Computersoftware aufgezeichnet und somit konnte die Mischleistung jedes einzelnen Mischvorganges ausgewertet werden.

Um die Grenzen des Mischgerätes auszutesten, wurde ein Beton mit speziellen Anforderungen an die Homogenität hergestellt, nämlich ultrahochfester Beton (UHPC). Dieser Spezialbeton zeichnet sich durch seine homogene Gefügestruktur aus, die entscheidend die Festigkeit beeinflusst (Abbildung 5-1).

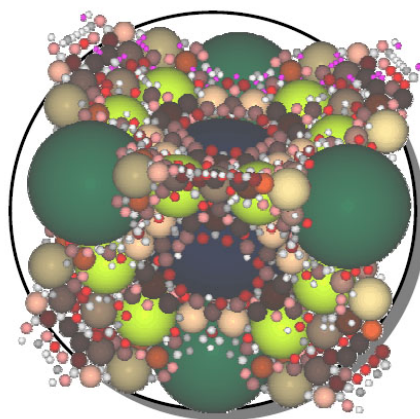


Abbildung 5-1: Gefügestruktur von UHPC [55]

Weitere Merkmale von UHPC sind seine extrem hohe Gefügedichte, die unter anderem durch die Füllung der Poren durch Zugabe von Mikrosilica entsteht, die Beschränkung des Größtkorns auf $< 1\text{ mm}$ und ein sehr niedriger W/B-Wert von rund 0,2.

Im Rahmen von Vorversuchen wurden verschiedene Mischungsentwürfe erprobt und schließlich folgende Mischung festgelegt: Für die Herstellung von UHPC wurden

- 180 kg/m^3 Wasser,
- 700 kg/m^3 Zement,
- 1230 kg/m^3 Zuschlag,
- 140 kg/m^3 Mikrosilica,
- 4,5 % (Cem) Fließmittel

benötigt. Die veränderlichen Parameter bei den Mischvorgängen waren:

- zwei verschiedene Mischwerkzeuge: Stern- und Stiftenwirbler,
- Zeit der Homogenisierung des trockenen Mischguts: 45 s, 90 s und 135 s,
- Geschwindigkeit des Wirblers: 10 %, 40 %, 60 % und 90 % der Höchstleistung.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden pro Mischvorgang 30 l Frischbeton hergestellt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- unterschiedlich lange Homogenisierung der Feinstoffe Zement, Mikrosilica und Quarzmehl,
- Beigabe des Zuschlages Quarzsand,
- Beigabe der flüssigen Bestandteile Wasser, Fließmittel und Entschäumer,
- Nachmischen.

An der fertigen Mischung wurden sowohl Frisch- als auch Festbetonprüfungen durchgeführt. Diese waren:

- Luftgehalt,
- Ausbreitmaß,
- Druckfestigkeit an Würfeln am ersten, 7. und 28. Tag,
- Biegezugfestigkeit an Prismen am 28. Tag,
- Porosität mittels Quecksilberporosimetrie.

Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Mit dem *Eirich*-Mischer ist ein reproduzierbares Mischen erstmals möglich geworden. Aufgrund seines geneigten rotierenden Mischbehälters entspricht die Geschwindigkeit des Mischgutes gleich der des Behälters, weshalb von der Bewegungsenergie direkt auf die Mischarbeit geschlossen werden kann.

Bei dem verwendeten Gerät R08W ist allerdings darauf zu achten, dass die trockenen Mischungsbestandteile während des Mischvorganges nicht durch die obere Einfüllöffnung verloren gehen. Bei den Versuchen im Labor wurde dieses Problem durch Abdecken der Öffnung mit einer Folie gelöst.

Ein weiterer Schwachpunkt des Mixers ist, dass das Herstellen von Beton mit sehr niedriger Geschwindigkeit nicht möglich war. Der Maschine wurde nicht ausreichend Energie zugeführt und der Mischvorgang musste frühzeitig abgebrochen werden. Aus diesem Grund liegen für zwei Proben keine Ergebnisse vor.

Die Mischungen mit höheren Geschwindigkeiten waren erfolgreicher. Doch auch zu hohe Geschwindigkeiten konnte die Mischmaschine nicht bewältigen. Bei den Mischungen mit dem Stiftenwirbler mit 90 % der Höchstgeschwindigkeit entstanden so starke Vibrationen, dass ein Teil des Gerätes beschädigt wurde. Ein Magnet, der dem Computer übermittelt, dass der Deckel des Mischbehälters geschlossen ist, wurde aufgrund der Vibrationen außer Kraft gesetzt. Trotz geschlossenem Deckel wurde aufgrund des defekten Magneten dem Computer übermittelt der Deckel sei geöffnet und deshalb ließ sich die Maschine nicht mehr in Betrieb nehmen. Das Problem konnte durch Austauschen des Magneten wieder behoben werden.

Ein großer Vorteil des *Eirich*-Mixers sind die austauschbaren Mischwerkzeuge. Der Sternwirbler ist dem Mischwerkzeug in einem herkömmlichen Betonmischer am ähnlichsten und liefert gute Ergebnisse. Doch erst durch den Einsatz des Stiftenwirblers konnte gezeigt werden, dass sich mit anderen Werkzeugen noch viel bessere Ergebnisse erzielen lassen.

Zur Herstellung von UHPC empfiehlt es sich einen Schrägtellermischer, wie den der Fa. *Eirich*, zu verwenden. Durch einen optimal dosierten Leistungseintrag kann die Qualität gesichert werden und das Endprodukt erfüllt die geforderten Eigenschaften.

5.2 Ausblick

Ultrahochfester Beton ist in vieler Hinsicht ein großartiger Baustoff und besitzt das Potential, in den verschiedensten Anwendungen eingesetzt zu werden – heute und in Zukunft. Die dichte Struktur und die sehr niedrige Porosität des UHPC machen ihn zu einem idealen Baustoff für Bauteile und Tragwerke, die aggressiven Medien ausgesetzt sind [37]. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss eine ausreichende Homogenität des Baustoffes gewährleistet sein. Kontrollierbare und vor allem reproduzierbare Mischvorgänge sind erforderlich.

Unbewehrte ultrahochfeste Betone weisen, wie die Versuche zeigten, ein schlagartig sprödes Versagen und eine im Verhältnis zur Druckfestigkeit niedrige Zugfestigkeit auf. Um eine ausreichende Duktilität zu erreichen, ist die Zugabe von Stahlfasern, eventuell auch in Kombination mit Polypropylen-Fasern erforderlich [46]. Um eine ausreichende Homogenisierung des Materials zu gewährleisten, sind kontrollierbare und vor allem reproduzierbare Mischvorgänge erforderlich.

Mit dieser Arbeit wird gezeigt, dass ein und derselbe Baustoffe je nach Herstellungsart unterschiedliche Eigenschaften aufweisen kann. Es ist daher wichtig, das Herstellungsverfahren – in diesem Fall den Mischprozess – zu vereinheitlichen. Dies ist nicht nur für den Baustoff UHPC, sondern für alle Baustoffe erforderlich. In weiteren Arbeiten könnte daher der Mischprozess anderer Baustoffe, z. B. Leichtbeton, untersucht werden. Oder es könnte der Mischvorgang bei der Herstellung von Faserbeton erforscht werden.

Mit der Weiterentwicklung der Baustoffe steigt auch die Vielzahl der Anwendungen.

Eine mögliche Anwendung von UHPC ist die Herstellung von Fertigteilen, die im stütznahen Bereich in Flachdecken eingesetzt werden und so die Möglichkeit schaffen, punktgestützte Flachdecken durchgehend mit Fertigteilen herstellen zu können (siehe Abbildung 5-2). Durch die hervorragenden Materialeigenschaften von UHPC soll das Fertigteil eine Steigerung des Durchstanzwiderstandes bewirken [56].

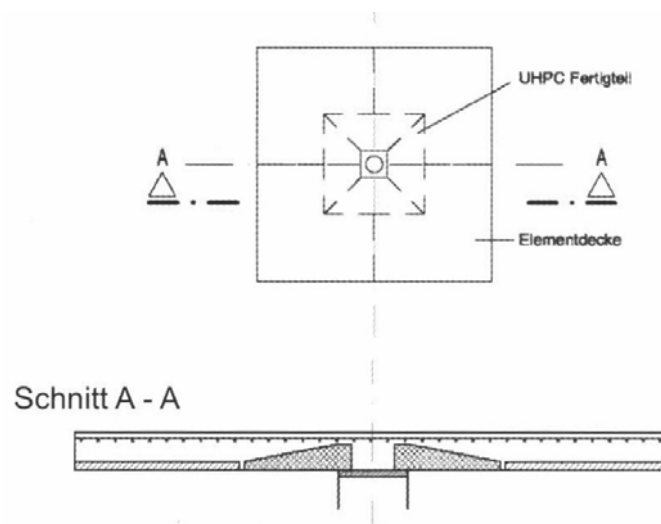


Abbildung 5-2: Variante für einen Versuchskörper [56]

Im gleichen Maß, in dem die fortschreitende Entwicklung der Betontechnologie mit der Erforschung des UHPC einen wesentlichen Fortschritt gemacht hat, hat auch die Erfindung des *Eirich*-Mischers in der Mischtechnologie für einen erheblichen Fortschritt gesorgt. Die Entwicklungen gehen Hand in Hand, und das ist auch gut so, denn ultrahochfester Beton kann nur mit der geeigneten Mischtechnik seine hervorragenden Eigenschaften entfalten. Und umgekehrt ist für den Wirbel-Mischer ein neues Anwendungsgebiet geboren worden.



Abbildung 5-3: Zukunftsvisionen der Beton- und Mischtechnologie

6 Summary

This master thesis aims at analysing the mixing process of ultra-high-performance concrete and to determine its effect on the properties of fresh and hardened concrete.

So far, mandatory specifications for the manufacturing process of concrete simply outline that mixing has to be performed in a mixer until the mix appears to be homogeneous, but fail to provide quantitative measures for the assessment of the uniformity. To the end of measuring the homogeneity of a mix and, thus, to be able to reproduce the mixing process, information on the mixing performance of the materials being mixed is required as well. This information can be derived when using an Eirich mixer that allows both determining the mixing work and to properly adjust it. The mixer used in the study at hand comes with the following features: two different agitators (star-type agitator and pin-type agitator), varying agitator speeds and modifiable direction of rotation of the mixing vessel and the agitator.

In order to probe the technical limitations of the mixer, a concrete with quite specific requirements on homogeneity, namely ultra-high-performance concrete (UHPC), was used in this study. This concrete is characterised by its homogeneous structure that considerably determines its strength. Further characteristics of UHPC can be found in its dense micro structure as a result of adding micro silica, a maximum particle size of 1 mm, and a very low water-binder-ratio of 0.2.

The laboratory tests strived for identifying the type of the agitator as well as settings for the speed of the agitator and the mixing time that in combination produce optimal homogeneity measured through comparisons of fresh concrete properties (slump test and air filled pores) and hardened concrete properties (compressive strength, bending tensile strength and Hg-Porosimetry).

Following the experiments it is recommended to use the pin-type agitator instead of the star-type agitator, to operate the agitators at a higher speed, and to use long mixing times. In order to fully exploit the capabilities of high-performance concretes, it is essential not only to optimise the mix design and to follow the given processing and curing guidelines, but also to focus on the production process itself with respect to required specifications. Hence, a proper mixing technique is of particular importance. [14] [58]

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

- [1] Heinz-Otto Lamprecht: „Opus Caementitium, Bautechnik der Römer“, Beton-Verlag, 3. Auflage, Düsseldorf 1987
- [2] Roma Antiqua: „Pantheon“, <http://www.roma-antiqua.de>, 08. 11.2005
- [3] Johannes Horvath: „Beiträge zum Brandverhalten von Hochleistungsbetonen“, Dissertation, TU Wien, 2003
- [4] Johannes Horvath: „Entwicklung von hochfestem Blähglasbeton“, Diplomarbeit, TU Wien, 1998
- [5] Jürgen Macht, Peter Nischer: „Weiche Betone – Kostengünstige Herstellung durch gute Mehlkornabstufung und gute Mischwirkung“, Betontag 2006, Kongress und Fachausstellung, Wien, 30.-31. März 2006
- [6] Matthias Kraume: „Mischen und Rühren“, WILEY-VCH Verlag, Weinheim 2003
- [7] Ralf Weinekötter, Hermann Gericke: „Mischen von Feststoffen“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1995
- [8] Wikipedia, die freie Enzyklopädie: „Diffusion“, <http://de.wikipedia.org/wiki/Diffusion>, 12.10.2005
- [9] BWI Beton Werk International: „Mischen von Beton – eine ständige Herausforderung“, Heft 03/2004
- [10] ÖNORM B 3303: Betonprüfung
- [11] Wissen.de: „gleichförmig“, <http://www.wissen.de>, 12.10.2005
- [12] Freenet Lexikon: „Homogenität“, <http://lexikon.freenet.de/Homogen>, 14.09.2005
- [13] Hans- Peter Wilke, Ralf Buhse, Klaus Groß: „Mischer“, Vulkan-Verlag, Essen 1991
- [14] BFT Betonwerk + Fertigteil-Technik: Symposium „Mischen – Steuern – Protokollieren“, Heft 5/2005, Seiten 68 bis 73
- [15] Eirich Druckschrift-Nr. BT 1426-0-de: „Eirich Mischtechnik für hochwertige Betone“, Seite 4
- [16] Eirich Druckschrift-Nr. MR 1365-4-de: „Eirich Intensivmischer Typ R“, Seite 5
- [17] Eirich Niederschrift: „Was macht die Eirich-Mischtechnik einzigartig?“, 2003

- [18] Michael Lins: „Verhalten von Ultrahochfesten Betonen (UHPC) unter Brandbeanspruchung“, Diplomarbeit, TU Wien, 2004
- [19] Ulrich Schneider: „Wiener Baustofflehre Blätter – Bindemittel“, TU Wien, Institut 206, 11.Auflage, 2001
- [20] Ulrich Schneider, Johannes Horvath: „Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen“, Schriftenreihe des Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Heft 8, 2003
- [21] Readymix AG: „Baustofftechnische Daten“, <http://www.readymix.de>, 20.10.2005
- [22] K. F. Kappl: „Ein Beitrag zur Entwicklung von Reactive Lightweight Concrete“, Diplomarbeit, TU Wien, 2000
- [23] Wilhelm Scholz: „Baustoffkenntnis“, 13. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf 1995
- [24] A. Pfeiler: „Auswirkungen der Nachbehandlung bei höheren Temperaturen auf die Druckfestigkeit von Reactive Powder Concrete, Diplomarbeit, TU Wien, 2000
- [25] Ulrich Schneider, Johannes Horvath: „Wiener Baustofflehre Blätter – Sondergebiete der Werkstoffe im Bauwesen“, TU Wien, Institut 206, 1. Auflage, 2003
- [26] E. Fehling, M. Schmidt, T. Teichmann, K. Bunje, R. Bornemann, B. Middendorf: „Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)“, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, kassel university press GmbH, Kassel 2005
- [27] Martin Hrunek: „Festigkeitsentwicklung eines hochfesten Tunnelbetons mit Stahlfasern unter Temperaturbeanspruchung“, Diplomarbeit, TU Wien, 2003
- [28] Feichtinger Gesellschaft m. b. H.: „Kristallquarzmehle“, Produktdatenblatt
- [29] Siegfried Härig, Dietmar Klausen, Rudolf Hoscheid: „Technologie der Baustoffe“, 14. Auflage, C. F. Müller Verlag, Heidelberg 2003
- [30] Thomas Richter: „Hochfester Beton – Hochleistungsbeton“, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf 1999
- [31] ÖNORM B 4710-1: „Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis“, 2004

- [32] Ulrich Schneider, Johannes Horvath, Gert König: „Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHPC)“, Ultrahochfester Beton, S.38-45, Stuttgart 2004
- [33] Datenblatt Firma Elkem Materials: „Elkem Mikrosilica Typ 940“, April 2005
- [34] Bundesverband der deutschen Zementindustrie: „Betonzusätze – Zusatzmittel und Zusatzstoffe“, Zement-Merkblatt Betontechnik, <http://www.bdzement.de>, 21.10.2005
- [35] Betontechnik GmbH: „Duriment LZF“, <http://www.betontechnik.at>, 21.10.2005
- [36] Gert König, Klaus Holschemacher, Frank Dehn: „Ultrahochfester Beton“, Bauwerk Verlag, Berlin 2003
- [37] Gert König, Frank Dehn: „Neue Entwicklungstendenzen in der Betontechnologie“, Baustofflehre, Bauphysik, Brandschutz: Festschrift zum 60. Geburtstag von U. Schneider, Wien, 2002, Seiten 95, 99-101
- [38] M. Schmidt, E. Fehling: „Ultra-Hochfester Beton, Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa“, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 2, kassel university press GmbH, Kassel 2003
- [39] E. Bölskey, J. Horvath: „Hochleistungsbeton – Herstellung und Anwendung“, Technopress-Baumagazin, 29 (2002), Nr. 4, S. 20-23
- [40] U. Schneider: „Wiener Baustofflehre Blätter – Festbeton“, TU Wien, Institut 206, 9. Auflage, 2001
- [41] J. Horvath: „Vorlesung: Sondergebiete der Werkstoffe im Bauwesen“, TU Wien, Institut 206, 25.-29. Mai 2005
- [42] ÖNORM EN 12390-3:2002: „Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern“
- [43] Wikipedia, die freie Enzyklopädie: „Ultrahochfester Beton“, [http://de.wikipedia.org/wiki/Ultrahochfester Beton](http://de.wikipedia.org/wiki/Ultrahochfester_Beton), 02.09.2005
- [44] Ronald König, Jörg-Peter Wagner: „Mikrosilica“, Handbuch der Firma Woermann
- [45] Johannes Horvath, Ulrich Diederichs: „Strukturuntersuchungen von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei hohen Temperaturen“, Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz: Festschrift zum 60. Geburtstag von U. Schneider, Wien, 2002, S. 61-74
- [46] BWI – BetonWerk International: „Forschung und Entwicklung im Dienst des Bauens“, Heft 04/2004

- [47] Precast/Prestressed Concrete Institute: „Precast, Prestressed Pedestrian Bridge – World’s First Reactive Powder Concrete Structure“, <http://www.pci.org>, 01.11.2005
- [48] djc.com: “Special concrete may give steel stiff competition“, <http://www.djc.com>, 01.11.2005
- [49] ÖNORM EN 12350-7:2000: „Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalte – Druckverfahren“
- [50] ÖNORM EN 12350-5:2000: „Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß“
- [51] ÖNORM EN 12390-2:2001: „Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen“
- [52] ÖNORM EN 12390-5:2001: „Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern“
- [53] POROTEC: „Bedienungsanleitung Porosimeter Pascal 140/240/440“
- [54] Dirk Lowke: „Untersuchungen zum Einfluss des Mischens auf die Frischbetoneigenschaften selbstverdichtender Betone“, Vortrag beim Symposium „Mischen – Steuern – Protokollieren“, Hardheim, 26. Jänner 2005
- [55] BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: „Arbeitsgruppe Zementgebundene Baustoffe, erweiterte Leistungsmerkmale“, <http://www.bam.de>, 02.09.2005
- [56] Helmut Zehentner: „Die Entwicklung von punktgestützten Flachdecken aus Fertigteilen“, Betontag 2006, Kongress und Fachausstellung, Wien, 30.-31. März 2006
- [57] Ulrich Schneider: „Wiener Baustofflehre Blätter – Frischbeton“, TU Wien, Institut 206, 10.Auflage, 2001
- [58] BFT Betonwerk + Fertigteil-Technik: Einfluss der Mischtechnik bei Hochleistungsbetonen, Heft 1/2006, Seiten 22 bis 28

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Pantheon in Rom [2].....	1
Abbildung 1-2: Spektrum der Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des W/Z-Wertes [3]	2
Abbildung 1-3: Gliederung der Arbeit	4
Abbildung 2-1: Mechanismen des Mischens [7]	7
Abbildung 2-2: Modelle zur Beschreibung des laminaren Mischens [6].....	8
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung von homogen und inhomogen [12].....	12
Abbildung 2-4: Verschiedene Mischzustände [6].....	13
Abbildung 2-5: Einfluss der Probengröße auf das Maß der Mischgüte [7].....	16
Abbildung 2-6: Überblick Mischertypen (in dieser Aufstellung sind nur die für die Arbeit relevanten Mischer in ihren Unterkategorien angeführt.).....	20
Abbildung 2-7: Mischprinzip eines <i>Eirich</i> -Mischers [15].....	22
Abbildung 2-8: Strömungsbild in einem <i>Eirich</i> -Mischer [16]	23
Abbildung 2-9: spezifische Mischleistung pro 100 kg Mischgut abhängig vom Wasserzusatz[14]	24
Abbildung 2-10: Vergleich der Mikrostruktur von Normalbeton, HPC und UHPC [18]	26
Abbildung 2-11: Beton als 5-Stoff-System.....	27
Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der Zementhydratation von Normalbeton (a) und Hochleistungsbeton (b) [27]	29
Abbildung 2-13: Gesamtwasserzugabe [30]	31
Abbildung 2-14: Schema der Gewinnung von Mikrosilica [44].....	33
Abbildung 2-15: Korngrößenverteilungsfunktionen ausgewählter Stoffe [44]	34
Abbildung 2-16: Veränderung der Porengrößenverteilung zufolge Mikrosilicazugabe [18]	34
Abbildung 2-17: Füllereffekt von Mikrosilica und Nanosilica [18].....	35
Abbildung 2-18: Anwendungsmöglichkeiten für Fließmittel [18]	37
Abbildung 2-19: Wirkungsweise von Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis [24]..	38
Abbildung 2-20: Schematische Darstellung der Hydratation eines Zementkorns [19]	40
Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der Stoffraumanteile in 1 m ³	41

Abbildung 2-22: Bruchfigur nach Druckversuch nach ÖNORM EN 12390-3 [42]	45
Abbildung 2-23: Vergleich der Porenradienverteilung verschiedener Betone [38]....	47
Abbildung 2-24: Zusammenstellung der Porositäten in Abhängigkeit von der Temperatur [45]	48
Abbildung 2-25: Sherbrooke Footbridge, Canada [47]	49
Abbildung 2-26: Vergleich verschiedener Querschnitte aus verschiedenen Materialien [48]	50
Abbildung 3-1: Sieblinie Quarzsand	52
Abbildung 3-2: Sieblinie Quarzmehl	53
Abbildung 3-3: Druckfestigkeiten <i>Michael Lins</i> [18]	54
Abbildung 3-4: Biegezugfestigkeiten <i>Michael Lins</i> [18].....	55
Abbildung 3-5: Zutaten für eine Betonmischung.....	56
Abbildung 3-6: Mischwerkzeuge: Sternwirbler (a) und Stiftenwirbler (b)	59
Abbildung 4-1: Eirich-Intensivmischer R08W.....	62
Abbildung 4-2: Steuerung des Mixers über den Touch-Screen	62
Abbildung 4-3: Aufzeichnung der Leistung während des Mischvorganges.....	63
Abbildung 4-4: Auswertung der Mischleistung bezogen auf 100 kg Einwaage.....	65
Abbildung 4-5: Vergleich der Mischleistung abhängig von der Geschwindigkeit	66
Abbildung 4-6: Mischarbeit Sternwirbler pro 100 kg Einwaage.....	68
Abbildung 4-7: Mischarbeit Stiftenwirbler pro 100 kg Einwaage	68
Abbildung 4-8: Mischarbeit (pro 100 kg Einwaage) beider Mischwerkzeuge im Vergleich.....	69
Abbildung 4-9: Druckmessgerät für Luftgehaltbestimmung von Frischbeton [49].....	71
Abbildung 4-10: Ergebnisse Luftgehalt Frischbeton	72
Abbildung 4-11: Ausbreittisch mit Form und Stößel [50].....	73
Abbildung 4-12: Ergebnisse Ausbreitmaß	74
Abbildung 4-13: Ausbreitmaß Mischung M5b, Stiftenwirbler mit 10% Geschwindigkeit (a) und Mischung M12b, Stiftenwirbler mit 90% Geschwindigkeit (b)	75
Abbildung 4-14: Ausbreitmaß in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.....	75
Abbildung 4-15: Ausbreitmaß: Vergleich beider Wirbler	76
Abbildung 4-16: Schalungen für Würfel 100x100x100 mm und Prismen 100x100x400 mm	77
Abbildung 4-17: Probekörperlagerung im Wasserbad	78
Abbildung 4-18: Prüfmaschine Druckfestigkeit [40]	79

Abbildung 4-19: Ergebnisse Druckfestigkeit des UHPC hergestellt im Wirblermischer mit Sternwirbler-Mischwerkzeug.....	80
Abbildung 4-20: Ergebnisse Druckfestigkeit des UHPC hergestellt in Wirblermischer mit Stiftenwirbler-Mischwerkzeug	81
Abbildung 4-21: Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zeit bei jeweils gleicher Homogenisierungsdauer	82
Abbildung 4-22: Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zeit bei jeweils gleicher Geschwindigkeit	85
Abbildung 4-23: Druckfestigkeiten nach 1d, 7d und 28d: Vergleich beider Wirbler ..	87
Abbildung 4-24: Darstellung der vier höchsten Druckfestigkeiten.....	89
Abbildung 4-25: Prüfung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen von M9b.....	90
Abbildung 4-26: Prüfung der Druckfestigkeit nach 7 Tagen von M9b.....	91
Abbildung 4-27: Prüfung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen von M2a.....	91
Abbildung 4-28: Schematische Darstellung der Biegezugprüfung (a) und Prüfmaschine (b) [52]	92
Abbildung 4-29: Ergebnisse der Biegezugprüfung	93
Abbildung 4-30: Biegezugfestigkeit beider Wirbler im Vergleich.....	94
Abbildung 4-31: Probekörper M9b vor (a) und nach dem Biegezugversuch (b)	95
Abbildung 4-32: Bruchfläche des Probekörpers M9b nach dem Biegezugversuch ..	95
Abbildung 4-33: Probekörper M10a nach dem Biegezugversuch.....	96
Abbildung 4-34: Probekörper M1a nach dem Biegezugversuch.....	96
Abbildung 4-35: Prüfprotokoll der Biegezugprüfung von M3b.....	97
Abbildung 4-36: Prüfprotokoll der Biegezugprüfung von M9b.....	98
Abbildung 4-37: Quecksilberporosimeter <i>PASCAL 140</i> und <i>440</i>	99
Abbildung 4-38: Materialprobe im Dilatometer.....	100
Abbildung 4-39: Dilatometer mit Probe und Quecksilber im <i>PASCAL 440</i> , Entfernung der Luft aus der Kapillare durch Befüllen mit Öl	101
Abbildung 4-40: Druck- und Porenverteilung von M10a aus der Quecksilberporosimetrie	105
Abbildung 4-41: Druck- und Porenverteilung von M3b aus der Quecksilberporosimetrie	106
Abbildung 4-42: Druck- und Porenverteilung von M9b aus der Quecksilberporosimetrie	107
Abbildung 4-43: Einfluss der Mischdauer auf den Beton [54]	112

Abbildung 5-1: Gefügestruktur von UHPC [55]	114
Abbildung 5-2: Variante für einen Versuchskörper [56]	118
Abbildung 5-3: Zukunftsvisionen der Beton- und Mischtechnologie	118

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Höchstzulässige Differenz der Prüfergebnisse [10]	10
Tabelle 2-2: Hauptklinkerphasen im Portlandzementklinker [21]	28
Tabelle 2-3: Chemisch-physikalische Kenndaten von <i>Elkem</i> Mikrosilica Typ 940 [33]	36
Tabelle 3-1: Sieblinienberechnung Quarzsand	52
Tabelle 3-2: Sieblinienberechnung Quarzmehl	53
Tabelle 3-3: Mischungsentwurf ME6 von <i>Michael Lins</i> [18]	55
Tabelle 3-4: Mischungsberechnung	57
Tabelle 3-5: Mischgeschwindigkeiten und Homogenisierungszeiten	58
Tabelle 3-6: Zeitplanung	60
Tabelle 4-1: Vergleich eines einfachen Mischers mit einem <i>Eirich</i> -Mischer	63
Tabelle 4-2: Mittelwerte Druckfestigkeiten	80
Tabelle 4-3: Übersicht der Interpretation von Abbildung 4-21	83
Tabelle 4-4: Übersicht der Interpretation von Abbildung 4-22	86
Tabelle 4-5: Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie	102
Tabelle 4-6: Zusammenfassung der Ergebnisse	109
Tabelle 7-1: Gegenüberstellung der Bezeichnungen	128

7.4 Gleichungsverzeichnis

Formel 2-1: Varianz [13]	15
Formel 2-2: Stichprobenvarianz [13]	15
Formel 2-3: Variationskoeffizient [13]	16
Formel 2-4: Fullerkurve [4]	30
Formel 2-5: modifizierte Fullerkurve [4]	30
Formel 2-6: W/B-Wert [31]	32
Formel 2-7: puzzolanische Reaktion von Silicazusatzstoffen [24]	35
Formel 2-8: Wasserzementwert [29]	39
Formel 3-1: Wassergehalt [10]	51

Formel 4-1: Leistung.....	64
Formel 4-2: Arbeit.....	67
Formel 4-3: Druckfestigkeit [42].....	79
Formel 4-4: Biegezugfestigkeit [52]	92
Formel 4-5: Mantelfläche für Zylinderporen [53]	102
Formel 4-6: Porosität [53]	103
Formel 4-7: Bulk Density [53]	103
Formel 4-8: Apparent Density [53].....	104

7.5 Hinweise

Aufgrund der ständig laufenden Reformen im Normenwesen ist es schwierig, einheitliche Bezeichnungen zu verwenden. Wo es möglich ist, werden die zum aktuellen Zeitpunkt gültigen Begriffe verwendet. Es kann allerdings vorkommen, dass auf Literatur verwiesen wird, oder Abbildungen verwendet werden, die noch alte Bezeichnungen aufweisen.

Die folgende Tabelle soll einen Überblick über die momentan gültigen Begriffe und ihre zugehörigen früheren Bezeichnungen verschaffen [57].

Tabelle 7-1: Gegenüberstellung der Bezeichnungen

Betonsorte										
ÖNORM B 4700	B15	B20	B25	B30	-	B40	-	B50	-	B60
ÖNORM B 4710-1 bzw. ÖNORM EN 206-1	C12/ 15	C16/ 20	C20/ 25	C25/ 30	C30/ 37	-	C35/ 45	C40/ 50	C45/ 55	C50/ 60
W/Z – W/B										
ÖNORM B 4700	W/Z-Wert		Wasser / Zement							
ÖNORM B 4710-1 bzw. ÖNORM EN 206-1	W/B-Wert		Wasser / Bindemittel = Wasser / (Zement+k·Zusatzstoff)							