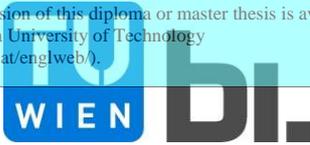


Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

**Ein Beitrag zur Herstellung von Hochleistungsbetonen
für textile 3D-Schalungssysteme**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Deix

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Horvath

E206

Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Jan Girzikowsky

9425440

1030 Wien, Sechskrügelgasse 10/10

Wien, am

eigenhändige Unterschrift

Hochleistungsbeton für textile Schalungssysteme

Werke dauern lange, so lange, wie sie uns beschäftigen. Je länger sie dauern, umso reicher können sie werden. Was fertig ist, was niemanden mehr berührt, ist am Ende.

Günter Behnisch

Kurzfassung

Gegenwärtig dokumentieren nationale und internationale Bauprojekte eindrucksvoll, dass schalenartige, amorphe Flächentragwerke aus unverkleidetem Beton wieder stärker in den Vordergrund treten. Bei der Ausführung derartiger Formen zeigen sich aber auch immer wieder die Risiken und Probleme der aufwendigen Gusstechnik. Die Errichtung geneigter oder räumlich gekrümmter Stahlbeton-Flächentragwerke ist nur mit hoch komplexen, lohnkostenintensiven Schalungen möglich. Zudem erschwert das hohe Schadensrisiko filigraner Schalenkonstruktionen eine wirtschaftliche Errichtung derartiger Bauwerke.

Rasante Entwicklungen auf der Werkstoffseite ermöglichen es aber zunehmend, die Mängel der Bauweisen auszugleichen.

Durch die Optimierung der heterogenen Zusammensetzung von Beton vor allem im mikrostrukturellen Bereich stehen heute mit den hochfesten und ultrahochfesten Betonen Werkstoffe zur Verfügung, die bezüglich Festigkeit, Duktilität und Dichtheit bereits die Qualität homogener, isotroper Baustoffe erreichen.

Ein Quantensprung in der Betonverarbeitung ist die Entwicklung des äußerst fließfähigen, selbstverdichtenden Betons, der den Gestaltungsmöglichkeiten im Hinblick auf Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit kaum noch Grenzen setzt. Neben diesen rein betontechnologischen Entwicklungen liegt der Schwerpunkt der Forschung zur Zeit auf der Entwicklung zementgebundener Verbundwerkstoffe. Vor allem der textilbewehrte Beton zeigt schon in einem frühen Forschungsstadium großes Leistungspotential, das durch die Verstärkung mit korrosionsunempfindlichen technischen Textilien erreicht wird.

Die vorliegende Arbeit greift die beschriebene Schalungsproblematik auf und versucht die betontechnologische Basis für eine neuartige Bauweise zur Herstellung dünnwandiger, geneigter und räumlich gekrümmter Flächentragwerke ohne Konterschaltung zu schaffen. Grundlage hierfür bildet die Idee, dreidimensionale Flächentextile, die in der Geotechnik sowie im Leicht- und Flugzeugbau bereits Anwendung finden, als Schalungskörper einzusetzen. Die durch Abstandsfäden verbundenen Decklagen übernehmen dabei die Funktion der zweiten Schalungslage.

Um derartige Abstandsgewebe befüllen zu können, sind geeignete, auf die Eigenschaften der 3D-Textilien abzustimmende Betonrezepturen zu entwickeln und zu prüfen.

In umfangreichen Vorversuchsreihen wurden drei Hochleistungsbetone entworfen, die sich durch eine auf die Gewebegeometrie abgestimmte Korngröße, eine äußerst fließfähige Frischbetonkonsistenz, weitgehend selbstverdichtendes Verhalten sowie hohe Festigkeiten auszeichnen. Hauptbestandteile der durchgeführten Versuche waren eine Abstimmung des Korngemischs, die Verifizierung der erforderlichen Fließmittelmenge sowie die Optimierung des Mischvorgangs und des Einbaus.

Aus den Vorversuchen gingen folgende Mischungen hervor, die für den Einsatz in 3D-Schalungssystemen am besten geeignet schienen:

UHPC1 - Ultrahochfester Beton mit Größtkorn 1 mm:

Die Mischung zeichnet sich besonders durch ein hohes Fließmaß von 31 cm aus, das trotz des geringen W/B-Wertes von 0,31 durch Zusatz eines Hochleistungsfließmittels im Ausmaß von 6,0 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, erreicht werden konnte. Festigkeitsprüfungen nach 28 Tagen ergaben eine Druckfestigkeit von 122 N/mm² und eine Biegezugfestigkeit von 15,1 N/mm².

UHPC2 - Ultrahochfester, stahlfaserbewehrter Beton:

Eine Steigerung der Festigkeiten sowie der Duktilität konnte bei der zweiten Mischung durch den Zusatz von 6 mm langen Stahlfasern erreicht werden. Die erzielte Druckfestigkeit lag bei 164 N/mm², die Biegezugfestigkeit bei 21,2 N/mm². Bei einem W/B-Wert von 0,31 wurde das Fließmaß von 30 cm durch Beigabe von 5,0 M.-% Fließmittel eingestellt.

HPC - Hochfester Beton mit Größtkorn 4 mm:

Da ultrahochfeste Betone normativ noch nicht erfasst sind und wegen der großen Menge an teuren Zusatzstoffen auch kostenintensiv sind, wurde als wirtschaftliche Alternative ein hochfester Beton mit einem Größtkorn von 4 mm entworfen. Bedingt durch den grobkörnigen Zuschlag wies die Mischung ein geringeres Fließmaß von 29 cm auf. Dafür können die erzielten Festigkeiten von 116 N/mm² bei

Druckbelastung und $12,8 \text{ N/mm}^2$ bei Biegezugbelastung als für hochfeste Betone überdurchschnittlich hoch eingestuft werden.

Anschließend wurden in Hauptversuchsreihen die Frisch- und Festbetoneigenschaften der ermittelten Rezepturen im Zusammenwirken mit den 3D-Textilien untersucht. Dazu wurden $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ große, 60° gegen die Horizontale geneigte, textile Schalkörper mit den zu prüfenden Betonmischungen befüllt.

Es konnte nachgewiesen werden, dass alle drei Mischungen in der Lage waren, die textilen Schalungssysteme lediglich unter Wirkung der Schwerkraft vollständig auszufüllen und sich weitgehend selbst zu verdichten.

Die Vermessung der ausgehärteten Probekörper zeigte, dass eine parallele und maßgenaue Geometrie auch durch eine Konterschalung aus Gewebedecklagen erreicht werden kann. Zudem zeichneten sich die textil geschalteten Proben durch eine weitgehend porenfreie Oberfläche hoher Güte aus (Entlüftung durch das Gewebe).

Eine Messung der Biegezugfestigkeiten an den textilen Probekörpern nach 28 Tagen ergab Werte zwischen $11,6 \text{ N/mm}^2$ und $22,3 \text{ N/mm}^2$, die sich nur geringfügig von den in den Vorversuchen ermittelten Werten unterschieden.

In einem abschließenden Großversuch wurde die baupraktische Eignung des zuvor im Labormaßstab entwickelten Verfahrens verifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass auch großformatige Betonbauteile mittels eines textilen Schalungssystems hergestellt werden können.

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass von der betontechnologischen Seite die Voraussetzungen für die Befüllung von Einwegschalungen aus textilen Zweiwandgeweben geschaffen wurden. Die extrem hohe Fließfähigkeit und das weitgehend selbstverdichtende Verhalten der entwickelten Hochleistungsbetone versprechen eine erfolgreiche Anwendung in neuartigen Schalungssystemen zur Herstellung von großformatigen Flächentragwerken

Abstract

Requirements for the geometry and capacity of buildings are presently increasing. Over the past couple of years the development of new types of concrete has provided engineers and architects with a wide range of new possibilities in terms of structural and formal design.

The invention of high-performance concrete in the last decades has led towards an enormous increase in the load-bearing capacity of this material. Nowadays compressive strengths of up to 800 N/mm^2 can be achieved with reactive powder concrete (compared with a strength of $20 - 50 \text{ N/mm}^2$ for normal concrete). A revolutionary step forward in concrete processing technologies is the development of self-compacting concrete (SCC). It offers new opportunities for creating building components with complex forms and surface effects.

Advances in strength and the ductile behavior of cementitious building materials as well as the invention of new reinforcement technologies (i.e. fibre- or textile-reinforced concrete) make it possible to reduce the cross-sectional dimensions of concrete elements. This leads to a lower overall weight and a more economical and sustainable form of construction since the use of raw materials is comparatively low, thus helping to conserve resources.

The growing complexity of forms and materials also has an increasing influence on the formwork technologies. New processes and techniques are yet to be developed in order to realize the full potential of these new high-performance concretes in terms of load-bearing capacity.

Recent projects have shown the difficulty of creating inclined concrete surfaces of a high quality on the construction site (in situ).

Extensive experience of self-compacting concretes, high-strength concretes as well as textile-reinforced concretes, acquired in various research projects over the last few years, has been the basis and motivation to take up the challenge and find new ways of solving these problems by combining new materials and techniques.

The objective of the experimental research was to develop different high-performance concretes that are suitable for their application in textile frameworks.

A new type of shuttering system consisting of a three-dimensional textile yarn (friction-spun hybrid yarn) was developed. In order to create a continuous cross-section and a consistent surface structure the second shuttering board, used in common formwork panels, was substituted by a much lighter textile structure.

The yarn, made of polyester fibers, consisted of two load-bearing layers with a space between them, tied together with pile threads. The spacing between the layers varied with the structural requirements. The pile threads ensured a predefined layer-distance and acted as a secondary reinforcement. When the concrete had reached a certain degree of strength and stability, the textile layers were removed.

In order to meet the special requirements for a three-dimensional textile yarn, various high-strength concretes with compressive strengths of at least 115 N/mm^2 were developed and tested. In order to make the aggregates suitable for textile structures the size of the largest grain was matched to the fiber spacing and to the opening width of the textile. Furthermore, the rheological properties were optimized to get an easy flowing, self-compacting matrix which completely fills the hollow shuttering body.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	14
1.1	Geschichtlicher Abriss	14
1.2	Ausgangssituation	15
1.3	Aufgabenstellung und Methodik	16
2	Grundlagen	18
2.1	Hochleistungsbeton	18
2.2	Hochfester Beton	19
2.2.1	Ausgangsstoffe	19
2.2.1.1	Zuschlag	19
2.2.1.2	Mehlkorn	19
2.2.1.3	Zement	20
2.2.1.4	Zusatzstoffe	20
2.2.1.5	Zusatzmittel	21
2.2.1.6	WB-Wert	21
2.2.2	Beispielrezepturen	21
2.2.3	Herstellung und Verarbeitung	22
2.2.4	Eigenschaften	23
2.2.4.1	Festigkeitsentwicklung	23
2.2.4.2	Verformungsverhalten	23
2.2.4.3	Bruchmechanik	23
2.2.4.4	Zeitabhängige Verformungen	24
2.2.4.5	Dauerhaftigkeit	24
2.2.4.6	Verhalten bei hohen Temperaturen	24
2.2.5	Anwendungen	24
2.3	Ultrahochfester Beton	25
2.3.1	Ausgangsstoffe	26
2.3.1.1	Zuschlag	26
2.3.1.2	Mehlkorn	26
2.3.1.3	Zement	26
2.3.1.4	Zusatzstoffe	26
2.3.1.5	Zusatzmittel	27

2.3.1.6	WB-Wert	27
2.3.1.7	Stahlfasern	27
2.3.2	Beispielrezepturen	28
2.3.3	Herstellung und Verarbeitung	28
2.3.4	Eigenschaften	29
2.3.4.1	Gefügestruktur	29
2.3.4.2	Zeitabhängige Verformungen	29
2.3.4.3	Mechanische Eigenschaften	30
2.3.4.4	Dauerhaftigkeit	30
2.3.4.5	Brandwiderstand	30
2.3.5	Anwendungen	30
2.4	Textilbeton	31
2.4.1	Einleitung	31
2.4.2	Entwicklung	31
2.4.3	Textile Werkstoffe	34
2.4.3.1	Herstellung	34
2.4.3.2	Fasern	35
2.4.3.3	Garne	39
2.4.3.4	Flächige Textilstrukturen	41
2.4.3.5	Dreidimensionale Textilstrukturen für dünnwandige Bauteile	46
2.4.3.6	Ausrüstung	47
2.4.4	Feinbeton	48
2.4.4.1	Anforderungen	48
2.4.4.2	Ausgangsstoffe	48
2.4.4.3	Mischungsaufbau	51
2.4.4.4	Eigenschaften des Feinbetons	52
2.4.5	Eigenschaften des Verbundwerkstoffs Textilbeton	53
2.4.5.1	Verbundverhalten	53
2.4.5.2	Tragverhalten	58
2.4.5.3	Dauerhaftigkeit	65
2.4.6	Prüfmethoden	67
2.4.6.1	Untersuchung des Verbundverhaltens	67
2.4.6.2	Untersuchung der Tragfähigkeit	68
2.4.6.3	Untersuchung der Dauerhaftigkeit	70
2.4.7	Anwendungen und Zukunftsperspektiven	72

2.4.7.1	Anwendungsbeispiele	72
2.4.7.2	Wirtschaftlichkeit und Produktionstechnologie	76
2.4.7.3	Zukunftsperspektiven	77
3	Vorversuche	79
3.1	Versuchsplanung	79
3.1.1	Vorbemerkungen	79
3.1.2	Vorgaben, Anforderungen	80
3.2	Mischungsaufbau und Mischungsentwurf	81
3.2.1	Ausgangsstoffe	81
3.2.1.1	Zuschlag	81
3.2.1.2	Mehlkorn	84
3.2.1.3	Mikrosilika	84
3.2.1.4	Zement	84
3.2.1.5	Fließmittel	84
3.2.1.6	Wasser	85
3.2.1.7	Stahlfasern	85
3.2.2	Mischungsentwurf	85
3.2.2.1	Vorbemerkungen	85
3.2.2.2	Betonrezeptur für ultrahochfesten Beton (UHPC)	86
3.2.2.3	Betonrezeptur für hochfesten Beton (HPC)	87
3.3	Versuchsdurchführung	88
3.3.1	Mischvorgang	88
3.3.2	Frischbetonprüfungen	90
3.3.2.1	Fließmaß	90
3.3.2.2	Luftporengehalt	91
3.3.3	Herstellung der Probenkörper	92
3.3.4	Nachbehandlung	92
3.3.5	Festbetonprüfungen	93
3.3.5.1	Biegezugfestigkeit	93
3.3.5.2	Druckfestigkeit	94
3.4	Auswertung	96
3.4.1	Frischbetonkennwerte	96
3.4.1.1	Fließmaß UHPC – Ultrahochfester Beton	96
3.4.1.2	Fließmaß HPC – Hochfester Beton	102

3.4.2	Entmischungserscheinungen	103
3.4.3	Festbetoneigenschaften	105
3.4.3.1	Druck- und Biegezugfestigkeit - UHPC1	106
3.4.3.2	Druck- und Biegezugfestigkeit - UHPC2	110
3.4.3.3	Druck- und Biegezugfestigkeit - HPC	113
3.4.3.4	Bruchverhalten	116
3.4.4	Mischungsauswahl	117
4	Hauptversuche	124
4.1	Versuchsplanung	124
4.1.1	Vorbemerkungen	124
4.1.2	Versuche an schrägen Prüfkörpern	124
4.2	Versuchsdurchführung	125
4.2.1	Textiles Zweiwandgewebe	125
4.2.2	Schalungssysteme	127
4.2.2.1	Konventionelles Schalungssystem	128
4.2.2.2	Textiles Schalungssystem	128
4.2.3	Herstellung Probekörper	130
4.2.4	Nachbehandlung	131
4.2.5	Festbetonprüfung	132
4.3	Auswertung	133
4.3.1	Befüllbarkeit des textilen Schalungssystems	133
4.3.2	Entschalbarkeit	135
4.3.3	Beschaffenheit der ausgeschalteten Probekörper	135
4.3.4	Biegezugfestigkeit	138
4.3.5	Kurzzeitverformungsverhalten	140
4.3.6	Bruchverhalten	142
4.3.7	Gefügestruktur	143
5	Großversuche	144
5.1	Versuchsplanung	144
5.1.1	Vorbemerkungen	144
5.1.2	Errichtung der tragenden Schalung	145
5.1.3	Verifizierung des Maßstabsfaktors	145
5.1.4	Verfahrensentwicklung	145

5.1.5	Messtechnische Untersuchung des Bogensegments	145
5.2	Textiles Schalungssystem	146
5.3	Mischungsaufbau	149
5.3.1	Ausgangsstoffe	149
5.3.1.1	Zuschlag	149
5.3.1.2	Mehlkorn	151
5.3.1.3	Mikrosilika	151
5.3.1.4	Zement	152
5.3.1.5	Fließmittel	152
5.3.1.6	Wasser	153
5.3.1.7	Stahlfasern	153
5.4	Mischungsentwurf	153
5.4.1	Vorbemerkungen	153
5.4.2	Betonrezeptur	154
5.4.2.1	Mischungszusammensetzung UHPC VV1	154
5.4.2.2	Mischungszusammensetzung UHPC VV2	154
5.4.2.3	Mischungszusammensetzung UHPC VV2 mit Stahlfasern	154
5.4.2.4	Mischungszusammensetzung UHPC GV	154
5.4.2.5	Stoffraumrechnung der Mischungszusammensetzungen	154
5.5	Versuchsdurchführung	159
5.5.1	Mischvorgang	159
5.5.2	Frischbetonprüfungen	160
5.5.2.1	Fließmaß	160
5.5.2.2	Luftporengehalt	160
5.5.3	Festbetonprüfungen	160
5.5.3.1	Biegezugfestigkeit	160
5.5.3.2	Druckfestigkeit	160
5.5.3.3	Ergebnisse der Festbetonprüfungen	161
5.5.4	Betonieren des Bogensegments	162
5.5.5	Ausschalen des Bogensegments	165
5.5.6	Belastungstest	167
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	174
7	Quellenverzeichnis	176

8	Normenverzeichnis	181
9	Abbildungsverzeichnis	182
10	Tabellenverzeichnis	186
11	Gleichungsverzeichnis	188
12	Begriffsbestimmungen	189

1 Einleitung

1.1 Geschichtlicher Abriss

Beton ist ein seit der Antike bekannter Baustoff, der jahrhundertlang ein Dasein im Untergrund fristet. Der Werkstoff aus Kies, Sand, Zement und Wasser wird hauptsächlich dort eingesetzt, wo er nicht sichtbar ist. Die Verwendung für technische Zweckbauten wie Fundierungen und Bunker sowie als Massenbaustoff für den Wohnungsbau nach dem zweiten Weltkrieg prägt das Bild des kalten, monotonen Werkstoffs. [1]

Erst als Mitte des 20. Jahrhunderts die statische Beherrschung des heterogenen Gusswerkstoffs gelingt, tritt Beton in einer gestaltgebenden Rolle auch an die Oberflächen der Bauwerke. Seine Fähigkeit nahezu jeder Form gewachsen zu sein lässt immer filigranere Schalenkonstruktionen entstehen, seine Oberfläche, die für sich schon dauerhaft ist, tritt als unverkleidete Sichtbetonfläche als gestaltendes Element hervor. [1]

Doch schon bald setzt der enorme Schalungsaufwand den Konstruktionen pragmatische Grenzen. Eine Weiterentwicklung ist nur mehr durch eine Minimierung der strukturellen Heterogenität des Betons möglich. Die Modifikation des bewährten Dreiphasen-Gemischs mit feinteiligen Zusätzen und chemischen Substanzen lässt in den 70er Jahren die neue Generation der Hochleistungsbetone entstehen, die sich durch Verbesserungen der Festigkeit, Duktilität und Verarbeitbarkeit auszeichnen. [1]

Die zunehmende Komplexität der Formensprache und der Betonwerkstoffe selbst, stellt aber auch immer höhere Ansprüche an die Schalungstechnik. Die Innovationen der Betontechnologie ermöglichen die Herstellung amorpher Objekte nahezu beliebiger Form, die mit herkömmlichen Schalungen nur mit größtem technischem und wirtschaftlichem Aufwand realisierbar sind. Um die Leistungspotentiale der Hochleistungsbetone tatsächlich ausschöpfen zu können sind hier bestehende Systeme zu optimieren und neue Wege zu beschreiten.

Dies ist der Ansatzpunkt für die vorliegende Arbeit.

1.2 Ausgangssituation

In jüngster Vergangenheit hat sich bei der Ausführung komplexer Hochbaukonstruktionen aus Stahlbeton gezeigt, dass gleichmäßige und strukturlose Oberflächen beim Betonieren in schräger Lage schwierig und meist in nicht zufriedenstellender Güte herzustellen sind.

Die umfangreichen Erfahrungen mit Hochleistungsbetonen sowie textilibewehrten Betonen, die in etlichen Forschungsvorhaben der vergangenen Jahre gesammelt wurden, haben dazu motiviert diese Problematik aufzugreifen und neue Lösungswege durch die Kombination bekannter Materialien und Verfahren zu finden.

Die Betontechnologie hat in den letzten Jahren mit den Hochleistungsbetonen Werkstoffe geschaffen, die sich durch eine minimierte Heterogenität des Gefüges auszeichnen. Durch die Begrenzung des Größtkorns im Zuschlag und die Optimierung des Zementsteins können die bruchmechanischen Unterschiede der beiden Komponenten auf ein Minimum reduziert werden und eine höhere Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit erzielt werden. Die Beimischung von puzzolanischen Zusatzstoffen, Hochleistungsverflüssigern und Stahlfasern ermöglicht die Herstellung duktiler Betone mit extrem hohen Druckfestigkeiten von bis zu 800 N/mm².

Gegenwärtig befindet sich dieser sogenannte Ultrahochfeste Beton noch in der Entwicklungsphase, wurde aber auch schon in Einzelfällen erfolgreich in der Praxis eingesetzt. Trotz der vergleichsweise höheren Kosten bezogen auf den Kubikmeter Beton verspricht die neue Betongeneration bei ganzheitlicher Betrachtung in speziellen Situationen wirtschaftliche Vorteile gegenüber konventionellem Beton. Die Reduktion der Querschnittsabmessungen durch hohe Festigkeiten und die Ersparnis zusätzlicher Abdichtungsmaßnahmen durch hohe Dichtigkeit machen Hochleistungsbetone in Zukunft durchaus konkurrenzfähig. [2]

Textilbeton ist eine Mitte der 90er Jahre entstandene Weiterentwicklung des Kurzfaserbetons. Technische Textilien werden als Bewehrung in spezielle Feinbetonmatrices eingebaut. Durch die Unempfindlichkeit der verwendeten Kunststoffe gegenüber korrodierenden Angriffen ist es möglich, auf die beim Stahlbeton üblichen Betondeckungen zu verzichten und sehr dünnwandige, räumliche Bauteile herzustellen.

Erste Forschungsergebnisse weisen dem textilbewehrten Beton ein hohes Leistungspotential aus und zeigen experimentell zukünftige Anwendungsgebiete dieses neuen Verbundwerkstoffs.

Hier sei vor allem die Möglichkeit erwähnt, dreidimensionale Textilstrukturen als bauteilintegrierte Schalungen einzusetzen. Die Textilien übernehmen nicht nur die Funktion der Bewehrung sondern dienen auch als verlorene Schalung. Neben einer Verbesserung des Brandschutzes bringt diese neue Technologie auch wirtschaftliche Vorteile, da das Ausschalen und die Nachbehandlung entfallen. [2]

Die neue Formensprache und die rasanten Entwicklungen in der Betontechnologie machen es für Schalungsbauer immer schwieriger wirtschaftlich zu arbeiten. Projektbezogene Schalungen, die nur einmal verwendet werden können, und besonders tragfähige Schalungselemente für geneigte Bauteile verursachen enorme Kosten. Außerdem muss die herkömmliche Schalungsplanungs-Software an die komplexen, dreidimensionalen Aufgaben angepasst werden.

Genauso wie die Geometrie der Bauwerke hat die Rheologie der neuen Betone großen Einfluss auf die Schalungstechnik. Extrem fließfähige Betone mit selbstverdichtenden Eigenschaften erfordern eine hohe Dichtigkeit der Schalung und eine exakte Anordnung der Schalungsfugen sowie eine spezielle Verankerung, da der Frischbetondruck durch die flüssige Konsistenz im Vergleich zu Normalbeton nahezu doppelt so groß ist.

1.3 Aufgabenstellung und Methodik

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Hochleistungsbetonen, die für den Einsatz in textilen Schalungssystemen zur Herstellung geneigter Flächen geeignet sind.

Die ermittelten Mischungszusammensetzungen sollen die Basis für die Entwicklung von Betonierverfahren zur Herstellung schräger Flächen ohne Konterschaltung bilden.

Entwicklungstechnische Grundlage ist ein neuartiges Schalungssystem, bei dem ein textiles Abstandsgewebe aus Polyesterfasern die Funktion der Konterschaltung übernimmt.

Die durch Abstandsfäden verbundenen Decklagen sollen einen über die Bauteillänge regelmäßigen Querschnitt gewährleisten und zu einer gleichmäßigen Oberflächenstruktur führen. Die Decklagen werden nach Erreichen einer ausschalfähigen Anfangsfestigkeit entfernt, die im Bauteil verbleibenden Abstandsfäden sollen eventuell als Sekundärbewehrung mitwirken.

Die Substitution einer zweiten Schalungslage durch ein deutlich leichteres Textil würde eine Reduktion des Schalungsgewichts mit sich bringen und die erforderliche Tragkonstruktion vereinfachen.

Für das Zweiwandgewebe werden verschiedene hochfeste Feinbetone entworfen, deren Rezepturen für den Einsatz in einem textilen Hohlkörpersystem optimiert sind. Anforderungen an die zu entwickelnden Mischungszusammensetzungen sind somit eine Abstimmung des Größtkorns auf die Geometrie der Abstandsfäden sowie eine fließfähige und selbstverdichtende Frischbetonkonsistenz, die ein vollständiges Ausfüllen des Gewebes ermöglicht.

Durch den Zusatz von Stahlfasern wird die Herstellung eines Betonkörpers angestrebt, der ohne massive Stahlbewehrung ausgeführt werden kann. Somit steht auch bei der Betonkomponente eine Gewichtsreduktion durch geringere Querschnittsabmessungen und Faserbewehrung im Vordergrund.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in einen einleitenden Grundlagenteil, der in die Thematik textilbewehrter Hochleistungsbetone einführen soll und in einen praktischen Teil, der die durchgeführten Versuche beschreibt, analysiert und kommentiert. Abschließend werden aus den erzielten Ergebnissen Schlussfolgerungen gezogen und mögliche Zukunftsperspektiven angeführt.

Begriffe, die einer weiteren Erklärung bedürfen, werden im Abschnitt „Begriffsbestimmungen“ definiert.

2 Grundlagen

2.1 Hochleistungsbeton

Als Hochleistungsbetone (High Performance Concrete, HPC) werden alle zementgebundenen Zusammensetzungen bezeichnet, die für spezielle Nutzungsanforderungen optimiert sind. Sie weisen im Regelfall ein dichteres Gefüge als Normalbeton auf, das zu einer Erhöhung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit führt [3]. Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über die unter dem Begriff Hochleistungsbeton subsummierten Betone.

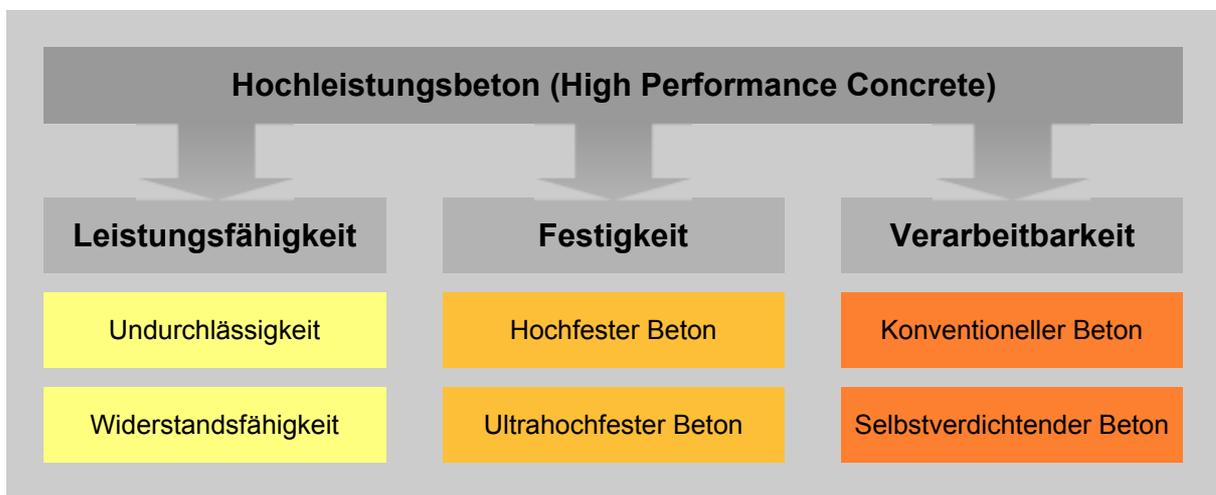


Abbildung 2-1: Klassifizierung der Hochleistungsbetone nach [6]

Eine Einteilung kann nach der Druckfestigkeit erfolgen. Betone mit Druckfestigkeiten größer als 60 N/mm^2 werden international als hochfeste Betone oder High Strength Concrete (HSC) klassifiziert [4]. Im österreichischen Normungswesen fallen alle Betone über Klasse C 50/60 gemäß ÖNORM B 4710-1 bzw. ÖNORM EN 206-1 unter diese Kategorie [5]. Ab einer Druckfestigkeit von $> 115 \text{ N/mm}^2$ spricht man von ultrahochfesten Betonen oder Ultra High Performance Concrete (UHPC) [6]. Diese normativ noch nicht erfassten Betone können Würfeldruckfestigkeiten von bis zu 800 N/mm^2 erreichen [7].

In der Literatur werden des Öfteren die Bezeichnungen High Performance Concrete und High Strength Concrete gleichbedeutend verwendet. In dieser Arbeit wird ebenfalls die Bezeichnung HPC als Synonym für hochfesten Beton verwendet.

Tabelle 2-1: Charakteristische Eigenschaften von Hochleistungsbetonen

Bezeichnung	Druckfestigkeit	Größtkorn	WB-Wert
	[N/mm ²]	[mm]	
Normalbeton	10 - 60	-	> 0,45
Hochfester Beton HPC	60 - 115	16	0,20 - 0,35
Ultrahochfester Beton UHPC	115 - 800	1	0,15 - 0,25

2.2 Hochfester Beton

Seit Einführung der ÖNORM B 4710-1 im Jahre 2002 sind in Österreich hochfeste Betone normativ erfasst. Normal- oder Schwerbetone mit einer Festigkeitsklasse über C 50/60 und Leichtbetone mit einer Festigkeitsklasse über LC 50/55 fallen unter diese Kategorie. Nach oben sind die hochfesten Betone durch die Festigkeitsklassen C 100/115 bzw. LC 80/88 begrenzt [6].

In Deutschland wird der Einsatz hochfester Betone seit Juli 2001 durch die DIN 1045 genormt [4].

2.2.1 Ausgangsstoffe

Charakteristisch für HPC sind niedrige WB-Werte sowie die Beimengung von reaktiven Zusatzstoffen und chemischen Zusatzmitteln.

2.2.1.1 Zuschlag

Als Zuschläge kommen quarzitisches Sande und Kiese mit möglichst geringem Wasseranspruch zur Anwendung. Die optimale Korngröße liegt bei 16 mm, ein Größtkorn von 8 mm oder 32 mm ist möglich, bringt aber nachteilige Effekte mit sich [3].

2.2.1.2 Mehlkorn

Die Zugabe von Mehlkorn oder Feinstand zur Abdeckung der Kornfraktionen unter 125 µm sollte wegen des erhöhten Wasseranspruchs und des negativen Einflusses auf das Schwind- und Kriechverhalten begrenzt werden. Empfohlene Obergrenzen sind je nach Zementanteil mit 500 kg/m³ bis 600 kg/m³ beziffert [3].

2.2.1.3 Zement

Einsatz finden beim HPC vor allem Normzemente wie Portlandzement oder Kompositzement mit Zumahlungen von latent hydraulischen oder puzzolanischen Zusatzstoffen.

Für die erforderlichen hohen Langzeitfestigkeiten sind im Allgemeinen Zemente mit hohen Tricalciumsilikat-Gehalten $[C_3S]$ und niedrigen Tricalciumaluminat-Anteilen $[C_3A]$ erforderlich. Somit empfiehlt sich der Einsatz von C_3A -freien HS-Zementen gemäß ÖNORM B 3327. Um eine möglichst hohe Frühfestigkeit zu erreichen wird hauptsächlich der rasch erhärtende Portlandzement CEM I 42,5 R verwendet.

Die erforderlichen Zementgehalte liegen über denen normalfester Betone, üblicherweise zwischen 380 kg/m^3 und 450 kg/m^3 [3].

2.2.1.4 Zusatzstoffe

Druckfestigkeiten von über 100 N/mm^2 können nur durch Beigabe von puzzolanisch reaktiven Zusatzstoffen wie Mikrosilika oder Flugasche erreicht werden.

Mikrosilika ist ein bei der Herstellung von Siliziummetallen anfallendes Nebenprodukt, dessen Hauptbestandteil amorphes Siliziumdioxid $[\text{SiO}_2]$ bildet. Die Staubpartikel weisen einen Durchmesser von $0,15 \mu\text{m}$ bis $0,25 \mu\text{m}$ auf und sind damit in der Lage die Hohlräume zwischen den um einen Faktor 100 größeren Zementkörnern auszufüllen und so das Zementsteingefüge zu verdichten und zu verfestigen. Außerdem bildet Mikrosilika an den Zuschlagskörnern zusätzliche Calciumsilikathydrat-Phasen $[\text{CSH}]$, die eine Verbesserung des Verbundes zwischen Zementstein und Zuschlag bewirken. In einer puzzolanischen Sekundärreaktion reagiert Silikastaub mit Calciumhydroxid $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ zu festigkeitssteigernden Calciumsilikathydraten. Übliche Zugabemengen für HPC sind 5 M.-% bis 15 M.-% bezogen auf den Zementgehalt.

Neben dem hauptsächlich angewendeten Mikrosilika kommen auch andere hochfein aufgemahlene inerte oder puzzolanische Mikrofüller wie z.B. Steinmehl, Karbonstaub, gemahlene Flugasche oder Hüttensand als Zusatzstoffe in Frage [3].

Tabelle 2-2: Kennwerte von Zement und Zusatzstoffen nach [3]

Kennwert	Zement	Flugasche	Mikrosilika
spezifische Oberfläche [m ² /g]	0,25 ... 0,40	0,22 ... 0,50	18 ... 25
Reindichte [kg/dm ³]	3,1 ... 3,2	2,1 ... 2,4	2,1 ... 2,2
Schüttdichte [kg/dm ³]	1,1 ... 1,2	0,7 ... 1,4	0,5 ... 0,7
mittlere Partikelgröße [µm]	15 ... 20	10 ... 30	0,15 ... 0,25

2.2.1.5 Zusatzmittel

Die niedrigen WB-Werte hochfester Betone machen die Beigabe hochwirksamer Fließmittel erforderlich. Sie dienen der Dispergierung der Zement- und Mikrosilikapartikel und der Gewährleistung einer weichen bis fließfähigen Konsistenz. Die neueste Generation von Verflüssigern basiert auf modifizierten Polycarboxylethern.

Ein grober Richtwert für die Fließmitteldosierung sind 5 l/m³ bis 10 l/m³ Beton je nach WB-Wert. Allerdings sind die Anwendungsbereiche der auf dem Markt befindlichen Fließmittel so breit gestreut, dass eine spezielle Abstimmung auf den jeweiligen Anwendungsfall erforderlich ist.

Vorteilhaft ist auch die Zugabe von Verzögerern und Luftporenbildnern falls ein Transport der Fertigmischung notwendig ist [3].

2.2.1.6 WB-Wert

Zur Reduktion des Kapillarporenraums im Zementstein sind WB-Werte unter 0,35 erforderlich. Bei WB-Werten unter 0,40 kommt es zu keiner vollständigen Hydratation des Zements, die Klinkerpartikel liegen unhydratisiert vor und tragen durch ihre hohe Eigenfestigkeit von 200 N/mm² bis 400 N/mm² zur Festigkeitsbildung bei. Außerdem bilden sie eine Hydratationsreserve für den Ausgleich von Fehlstellen und Mikrorissen und erhöhen so die Dauerhaftigkeit des Betons [3].

2.2.2 Beispielrezepturen

Da Mischungsentwürfe hochfester Betone meist auf Grundlage bereits ausgeführter Beispielrezepturen erfolgen, sei an dieser Stelle eine Aufstellung von Anhaltswerten für verschiedene Festigkeitsklassen aus der Literatur angeführt.

Tabelle 2-3: Beispielrezepturen für hochfesten Beton nach [3]

Festigkeitsklasse nach DIN 1045	B65	B75	B85	B95	B115
Zuschlag [kg/m ³]	1.860,0	1.930,0	1.800,0	1.775,0	2.080,0
Zement [kg/m ³]	420,0	340,0	420,0	450,0	450,0
Wasser [kg/m ³]	125,0	123,0	135,0	126,0	119,0
Fließmittel [kg/m ³]	13,0	13,0	13,0	18,0	23,0
Verzögerer [kg/m ³]	-	-	-	1,5	2,0
Mikrosilika [kg/m ³]	-	30,0	40,0	45,0	45,0
Flugasche [kg/m ³]	-	-	-	-	115,0
Frischbetonrohddichte [kg/m ³]	2.418,0	2.436,0	2.408,0	2.415,5	2.834,0
WB-Wert	0,32	0,35	0,32	0,28	0,26
Druckfestigkeit (28d) [N/mm ²]	80,0	90,0	100,0	125,0	135,0

2.2.3 Herstellung und Verarbeitung

Um eine hohe und konstante Qualität zu erzielen sind die Ausgangsstoffe mit möglichst hoher Genauigkeit zu dosieren.

Die Mischzeit sollte zum Erreichen einer gleichmäßigen Verteilung aller Ausgangsstoffe und einer maximalen Verflüssigerwirkung je nach Mischer und Rezeptur zwischen 60 und 180 Sekunden betragen. Die zähe und klebrige Konsistenz des Frischbetons erfordert eine hohe Mischintensität [3].

Aus der Literatur sind die unterschiedlichsten Mischabläufe bekannt, in jedem Fall sollten aber folgende Punkte eingehalten werden [3]:

- Dosieren von Zuschlag, Zement und Anmachwasser zu Beginn des Mischprozesses
- Zugabe von Mikrosilika vor der Fließmitteldosierung
- Verflüssigerzugabe am Ende des Dosierprozesses
- Verzögerer gleichzeitig mit der Fließmittelbeigabe oder danach
- Eventuelles Nachdosieren des Fließmittels nach längerem Transport

Bei der Verarbeitung hochfester Betone auf der Baustelle sind die besonderen Eigenschaften des Frischbetons zu beachten.

Werden keine verzögernden Zusatzmittel beigegeben ist mit einem schnelleren Ansteifen als bei normalfesten Betonen zu rechnen. Außerdem erfordern hochfeste

Betone wesentlich höhere Verdichtungsenergien und längere Rüttlerzeiten um beim Einbringen vollständig zu entlüften. Ordnungsgemäß verdichteter HPC weist Luftgehalte von 1,5 Vol.-% bis 3,0 Vol.-% auf [3].

Die allgemeinen Regeln zur Nachbehandlung normalfester Betone gelten auch für hochfeste Betone. Dem jungen Beton muss nach dem Einbringen ausreichend Wasser zugeführt werden um das Austrocknen der Oberfläche zu verhindern und für eine ungestörte Hydratation zu sorgen. Die Mindestdauer der Nachbehandlung sollte zwei bis drei Tage nicht unterschreiten, im optimalen Fall sieben Tage betragen [3].

2.2.4 Eigenschaften

2.2.4.1 Festigkeitsentwicklung

Hochfeste Betone erreichen im Vergleich zu konventionellen Betonen sehr hohe Frühfestigkeiten. Aufgrund der niedrigeren WB-Werte kommt es zu einer schnelleren Freisetzung großer Wärmemengen in den ersten Tagen und einer beschleunigten Hydratation. Die möglicherweise daraus resultierenden Eigenspannungen und Mikrorisse beeinflussen die Endfestigkeit nachteilig. Der Erhärtungsprozess hochfester Betone muss daher durch geeignete temperatursenkende Maßnahmen so gesteuert werden, dass eine gleichmäßige Festigkeitsentwicklung gewährleistet ist und keine Verschlechterung der Dauerhaftigkeit eintritt [3].

2.2.4.2 Verformungsverhalten

HPC weist eine höhere Sprödigkeit als Normalbeton auf. Dies äußert sich in einer vergrößerten Stauchung bei Erreichen der Bruchlast und nur geringen ertragbaren Stauchungen nach Erreichen der Bruchlast. Bei druckbeanspruchten Bauteilen kann die Stahlfestigkeit durch die vergrößerte Betonstauchung besser ausgenützt werden [3].

2.2.4.3 Bruchmechanik

Durch die höhere Zementsteinfestigkeit und die verbesserte Verbundwirkung zwischen Zuschlag und Zementstein bestehen signifikante bruchmechanische Unterschiede zwischen normalfesten und hochfesten Betonen. Die Bruchfläche verläuft beim HPC nicht um die Zuschlagskörner herum sondern im Wesentlichen durch sie hindurch [3].

2.2.4.4 Zeitabhängige Verformungen

Auch im Hinblick auf das Schwind- und Kriechverhalten ergeben sich qualitative Unterschiede zu normalfesten Betonen. Das Gesamtschwinden ist anfangs höher, stabilisiert sich später aber auf vergleichbarem Niveau. Die reduzierten WB-Werte verringern das Trocknungsschwinden, die Volumendifferenz der unhydratisierten Ausgangsstoffe und der Hydratationsprodukte verstärkt allerdings das chemische Schwinden. Durch die Verwendung von Zementen mit niedrigen C_3A -Gehalten kann der daraus resultierenden Bauteilverkürzung entgegengewirkt werden. Die Kriechverformungen sind geringer als bei Normalbeton und erreichen schneller ihren Endwert [3].

2.2.4.5 Dauerhaftigkeit

Der Widerstand gegen mechanische, physikalische und chemische Angriffe ist bei hochfesten Betonen vor allem durch die verbesserte Gefügestruktur wesentlich höher. Die verringerte Festbetonporosität und die kleineren Porengrößen vermindern die Durchlässigkeit für flüssige und gasförmige Medien. Dies qualifiziert den HPC als Baustoff für extreme Umweltbedingungen und robuste, wartungsarme Konstruktionen mit langer Lebensdauer [3].

2.2.4.6 Verhalten bei hohen Temperaturen

Die unterschiedliche Mikrostruktur hochfester Betone gegenüber normalfesten Betonen wirkt sich nachteilig auf das Brandverhalten aus. Die Zementsteinmatrix ist stärker an der Lastabtragung beteiligt, wodurch es im Temperaturbereich von 100 °C bis 300 °C zu deutlichen Festigkeitsverlusten kommt. Die Dichtigkeit der Zementmatrix behindert zudem den Dampfdruckausgleich bei Erwärmung, sodass eine Neigung zu explosionsartigen Abplatzungen der äußeren Betonschalen besteht. Durch eine oberflächennahe Schutzbewehrung oder die Zugabe von Polypropylenfasern kann dem verminderten Feuerwiderstand entgegengewirkt werden [3].

2.2.5 Anwendungen

Die Anwendungsgebiete des hochfesten Betons reichen vom Hochbau über den Brücken- und Straßenbau bis hin zu Abwasseranlagen und Kühltürmen. Überall dort wo hohe Ansprüche an die Lastabtragung und Dauerhaftigkeit gestellt werden findet der HPC national und international bereits Anwendung.

Sein zukünftiges Potential liegt weniger im Einsatz als Massenbaustoff sondern vielmehr dort wo nutzungsgerechte, wirtschaftliche und architektonisch ansprechende Lösungen bei hohen Bauteilbeanspruchungen notwendig sind [4].

2.3 Ultrahochfester Beton

Eine weitere Verbesserung der Eigenschaften hochfester Betone wurde Mitte der 90er Jahre durch die Entwicklung der ultrahochfesten Betone in Frankreich erreicht [7].

Folgende Maßnahmen ermöglichten die Herstellung von Betonen mit Druckfestigkeiten weit über 115 N/mm² [7]:

- Reduzierung des Wasserbindemittelwertes (WB-Wert) zur Vermeidung von Kapillarporen in der Zementmatrix
- Verbesserung der Homogenität des Betongefüges durch die Elimination von Grobzuschlägen
- Verbesserung der Packungsdichte durch Optimierung des Korngemisches und Aufbringung von Druck vor und während des Erstarrens bzw. Erhärtens des Betons

Die derzeit geläufigen Bezeichnungen für Hochleistungsbetone mit sehr hohen Festigkeiten leiten sich aus der speziellen Zusammensetzung des Mörtel-Zuschlag-Systems ab, in dem sehr feine Zuschläge mit reaktiven Zusatzstoffen kombiniert werden. Man spricht von *Béton de Poudres Réactives* (BPR) bzw. *Reactive Powder Concrete* (RPC). Im deutschsprachigen Raum sind die Bezeichnungen *Feinkorn- oder Reaktionspulverbeton*, bzw. *ultrahochfester Beton* oder *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) üblich. Des Weiteren werden diese Hochleistungsbetone namentlich nach Art der Herstellung unterschieden. *Compact Granular Matrix Concrete* (CGM-Beton) bzw. *Densified with Small Particles Concrete* (DSP-Beton) bezeichnet Betonarten mit hohem Fließmittelgehalt, hochreaktiven puzzolanischen Zusatzstoffen und Zuschlägen mit hoher Eigenfestigkeit und sehr geringer Korngröße. Als *Macro Defect Free Concrete* (MDF-Beton) wiederum werden kunststoffmodifizierte Hochleistungsmörtel bezeichnet, bei denen Kompositzelemente mit hohem Aluminatgehalt oder Tonerdezemente Verwendung finden [7].

2.3.1 Ausgangsstoffe

2.3.1.1 Zuschlag

Als Zuschlag werden ausschließlich quarzitisches Feinsand verwendet, deren Korngröße üblicherweise zwischen 150 µm und 1.000 µm liegt [6]. Es wird bevorzugt Natursand eingesetzt, der einen etwas geringeren Wasseranspruch als Brechsand aufweist [7]. Die Sieblinie der Zuschläge muss eine auf den Zement abgestimmte, möglichst stetige Kornverteilung aufweisen, die mit Hilfe einer modifizierten Fullerparabel ermittelt werden kann [6].

2.3.1.2 Mehlkorn

Zur weiteren Festigkeitssteigerung wird gemahlener kristalliner Quarz mit einem mittleren Korndurchmesser von 5 µm bis 25 µm beigegeben, der in etwa die Korngröße von Zement (15 µm bis 20 µm) aufweist, und durch seine große spezifische Oberfläche (ca. 0,38 m²/g) zur Verringerung der Zementleimschichtdicken beiträgt [7].

2.3.1.3 Zement

Als günstig hat sich die Verwendung von modifizierten Portland- oder Portlandhüttenzementen mit niedrigen C₃A-Gehalten (HS-Zemente) erwiesen. Der Einsatz konventioneller, schnell erstarrender hochfester Zemente (z.B. CEM I 52,5 R) ist ebenfalls möglich, bringt allerdings den Nachteil eines erhöhten Wasseranspruchs mit sich. Generell sollten nur Zemente mit niedrigen Blaine-Werten zur Herstellung von UHPC herangezogen werden, um den Wasseranspruch so gering wie möglich zu halten [7].

2.3.1.4 Zusatzstoffe

Die Beigabe von Mikrosilika ist, wie schon beim hochfesten Beton beschrieben, auch bei ultrahochfesten Betonen unerlässlich. Im Unterschied zum HPC kommt allerdings nur unverdichteter Silikastaub in Frage, da der Wassergehalt von Suspensionen den Gesamtwassergehalt der Mischung überschreiten würde. Ein Richtwert für die Dosierung von Mikrosilika kann mit ca. 25 M.-% bezogen auf den Zementgehalt angegeben werden [7].

2.3.1.5 Zusatzmittel

Die hohe Menge an fein- und feinstteiligen Ausgangsstoffen sowie die sehr niedrigen WB-Werte machen den Einsatz von hochwirksamen Fließmitteln erforderlich. Hochleistungsverflüssiger auf Polyacrylat- und Polycarboxylatetherbasis müssen in vergleichsweise großen Mengen beigegeben werden um die notwendige Dispergierung der Partikel zu gewährleisten und Agglomerationen zu verhindern. Der Einfluss der großen Fließmittelmengen auf das Erhärtungsverhalten des Mörtels muss im jeweiligen Einzelfall getestet werden [7].

2.3.1.6 WB-Wert

WB-Werte liegen für ultrahochfeste Betone im Idealfall zwischen 0,13 und 0,15, maximal jedoch bei 0,25. Loukili et al. berichten sogar von Mischungen mit einem WB-Wert von 0,09 [7].

2.3.1.7 Stahlfasern

Wie alle hochfesten Materialien zeigt auch der UHPC eine starke Tendenz zur Versprödung. Der geringe Porengehalt führt zu einer schlagartigen Rissausbreitung, hohen Bruchenergien und einem Versagen ohne Vorankündigung [8].

Um die Duktilität zu erhöhen werden daher Stahlfasern zur Energiedissipation zugesetzt. Die optimale Fasergeometrie wird von der jeweiligen Mischungszusammensetzung und dem gewünschten Effekt bestimmt. Faserlängen l_f zwischen 4 mm und 20 mm und Durchmesser d_f im Bereich von 0,08 mm bis 0,5 mm wurden bereits erfolgreich zur Verbesserung der Zähigkeit und Erhöhung der Biegezugfestigkeit angewendet [7].

Für UHPC gebräuchliche Stahlfasergehalte liegen zwischen 1,5 und 3,0 Vol.-% [7].

2.3.2 Beispielrezepturen

Tabelle 2-4: Beispielrezepturen für ultrahochfesten Beton nach [7]

		UHPC1	UHPC2	UHPC3
Zuschlag	[kg/m ³]	1.098,0	997,0	872,0
Zement	[kg/m ³]	1.000,0	950,0	980,0
Wasser	[kg/m ³]	140,0	180,0	186,0
Fließmittel	[kg/m ³]	12,0	17,0	18,0
Mikrosilika	[kg/m ³]	250,0	237,0	225,0
Stahlfasern	[kg/m ³]	-	146,0	617,0
Frischbetonrohddichte	[kg/m ³]	2.500,0	2.527,0	2.898,0
WB-Wert		0,112	0,15	0,14
Druckfestigkeit (28d)	[N/mm ²]	252,0	-	-

2.3.3 Herstellung und Verarbeitung

Die niedrigen WB-Werte, hohen Stahlfasergehalte und die geforderte Homogenität ultrahochfester Betone erfordern eine exakte Dosierung der Ausgangsstoffe sowie spezielle Mischvorgänge [7].

Die Angaben in der Literatur über Mischreihenfolge und Mischdauer variieren stark. Exemplarisch sei hier folgender Mischvorgang angeführt, der auch die Grundlage für die durchgeführten Versuche darstellt [9]:

- Trockenem vormischen aller pulverförmigen Bestandteile
- Zugabe der halben Zuschlagsmenge und des im Anmachwasser gelösten Fließmittels
- Zugabe des restlichen Zuschlags erst nach Erreichen einer plastischen Konsistenz
- Untermischen der Stahlfasern

Die Mischdauer beträgt im Allgemeinen zwischen 5 und 10 Minuten [10]. Durch das lange und intensive Mischen werden große Mengen an Luft eingeschlagen, die nur durch das Aufbringen von Unterdruck nach den letzten Mischphasen ausgetrieben werden können [7].

Erst durch eine geeignete Nachbehandlung kann UHPC seine hohe Dichte und damit Festigkeit erreichen. Bisher bekannte und angewandte Verfahren sind die Drucknachbehandlung und die Wärmenachbehandlung [7].

Die Beaufschlagung des Frischbetons mit Druck während der anfänglichen Erstarrungsphase bewirkt ein teilweises Auspressen des Anmachwassers sowie eine Reduktion eingeschlossener Luftbläschen. Die Drucknachbehandlung kann bei kleinen Bauteilen dadurch zu einer Steigerung der relativen Dichte von über 2 % führen [7].

Das Grundprinzip der thermischen Nachbehandlung ist die Verringerung der Porosität durch eine Beschleunigung der Hydratation. Die Nachbehandlung kann feucht oder trocken bei normalem oder erhöhtem Druck erfolgen [7]. Eine Nachbehandlungstemperatur von 90 °C kann bei einer Wasserbadlagerung von 48 Stunden eine Druckfestigkeitssteigerung von nahezu 40 % gegenüber einer Wasserbadlagerung bei 20 °C bewirken [11].

2.3.4 Eigenschaften

2.3.4.1 Gefügestruktur

Die strukturelle Heterogenität des Gefüges ist beim UHPC durch die Angleichung der Eigenschaften von Zuschlag und Zementstein signifikant reduziert [7].

Das Gefüge weist eine sehr homogene Verteilung der einzelnen Bestandteile in einer extrem dichten Betonmatrix und ein faserartiges Netzwerk von CSH-Phasen auf [7].

Durch die puzzolanische Reaktion des Mikrosilikas ist die üblicherweise schwache Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag eliminiert [6].

Der Porenraum wird nur mehr von Gelporen kleiner als 0,1 µm und Kapillarporen zwischen 0,1 µm und 1 µm gebildet. Die festigkeitsmindernden Verdichtungsporen größer als 1 mm sind durch die Beigabe von Silikastaub eliminiert. Die Porosität von UHPC liegt bei etwa 4 % [7].

2.3.4.2 Zeitabhängige Verformungen

Das Schwindverhalten ultrahochfester Betone entspricht in etwa dem der hochfesten Betone. Das durch die noch niedrigeren WB-Werte verstärkte chemische Schwinden kann beim UHPC durch Drucknachbehandlung ausgeglichen werden [6].

Über das Kriechverhalten können aufgrund fehlender Langzeituntersuchungen noch keine Aussagen gemacht werden [6].

2.3.4.3 Mechanische Eigenschaften

Während die Druckfestigkeit stark von der Temperatur und Nachbehandlungsdauer abhängig ist, kann die Biegezugfestigkeit hauptsächlich über den Stahlfasergehalt beeinflusst werden [6].

Die hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringer Zähigkeit führt beim UHPC zu einem schlagartigen und explosiven Versagen bei Überbelastung. Durch die Einbindung von Stahlfasern in die Matrix können bei gutem Haftverbund Kräfte besser übertragen und die Bruchzähigkeit gesteigert werden. [8]

2.3.4.4 Dauerhaftigkeit

Die extrem kleine Porosität macht den ultrahochfesten Beton sehr Widerstandsfähig gegen das Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen. Gegenüber konventionellen hochfesten Betonen weist der UHPC eine wesentlich kleinere Geschwindigkeit der Karbonatisierung, sehr gute Frost-Tausalz-Beständigkeit und einen besseren Abriebwiderstand auf [7].

2.3.4.5 Brandwiderstand

UHPC weist ein ähnliches Brandverhalten wie hochfeste Betone auf. Verminderte Festigkeiten bei hohen Temperaturen und explosionsartige Abplatzungen wirken sich auch hier nachteilig auf den Brandwiderstand aus.

2.3.5 Anwendungen

Die im jetzigen Entwicklungsstadium noch schwierig zu beherrschende Herstellung und aufwendige Nachbehandlung qualifiziert den UHPC in naher Zukunft hauptsächlich als Werkstoff für vorgefertigte Bauteile. Um den neuen Hochleistungsbaustoff noch effizienter einsetzen zu können ist die Entwicklung neuer Querschnittsformen nötig, die im Stahl- und vor allem Spannbetonbau Anwendung finden können [7].

2.4 Textilbeton

2.4.1 Einleitung

Seit Jahren werden im Bauwesen erfolgreich Verbundbaustoffe wie Stahl- oder Kurzfaserbeton eingesetzt. Aufgrund der umfangreichen und positiven Erfahrungen bei der Anwendung dieser Technologien beschäftigt sich die Wissenschaft und Forschung seit kurzem mit textiler Bewehrung als Verstärkungselement für zementgebundene Matrices. Vorteile textiler Flächengebilde gegenüber herkömmlichen Stahl- bzw. Kurzfaserbewehrungen liegen dort, wo besonderer Wert auf Dünnwandigkeit von Bauteilen, duktilen Materialverhalten und Rissweitenbeschränkung gelegt wird. Dieser jungen und innovativen Technologie können, auch wegen ihrer hohen Wirtschaftlichkeit bei zukünftiger industrieller Herstellung, gute Zukunftsperspektiven vorausgesagt werden.

2.4.2 Entwicklung

Mitte der 90er Jahre wurden erste Versuche unternommen die Vorteile der herkömmlichen Verbundbaustoffe Stahlbeton und Kurzfaserbeton zu kombinieren. Ziel war es, die im Faserbeton bislang ungerichtet eingebauten Kurzfasern zu textilen Strukturen zusammenzufassen und wie beim Stahlbeton dem Kräfteverlauf angepasst einzubauen.

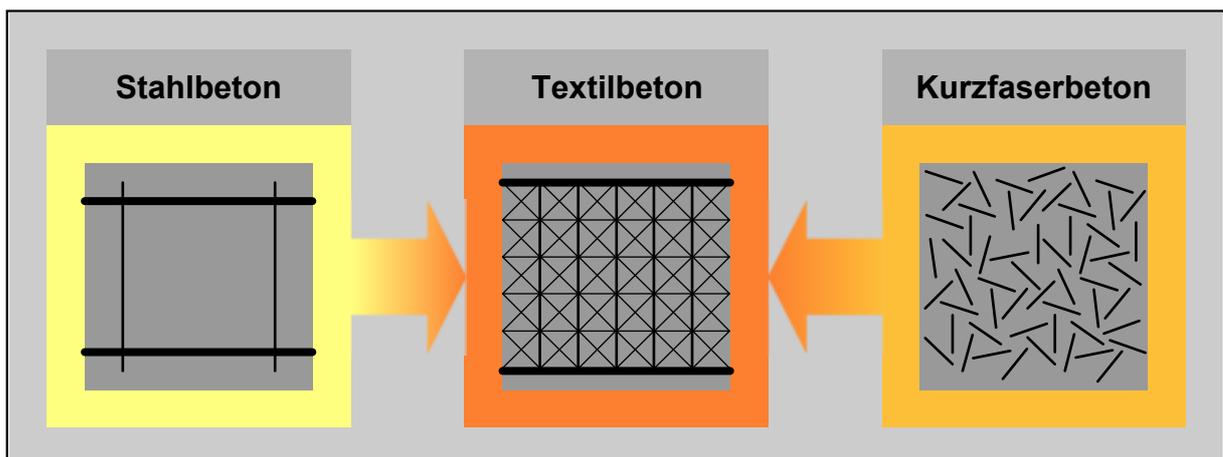


Abbildung 2-2: Entwicklung des Textilbetons nach [12]

Bei der Entwicklung des neuartigen Werkstoffs machte man sich neben den im Bauwesen eingesetzten Technologien des Verbund- und Massivbaus auch die Erfahrungen des Maschinenbaus mit Faser-Verbund-Kunststoffen zunutze.

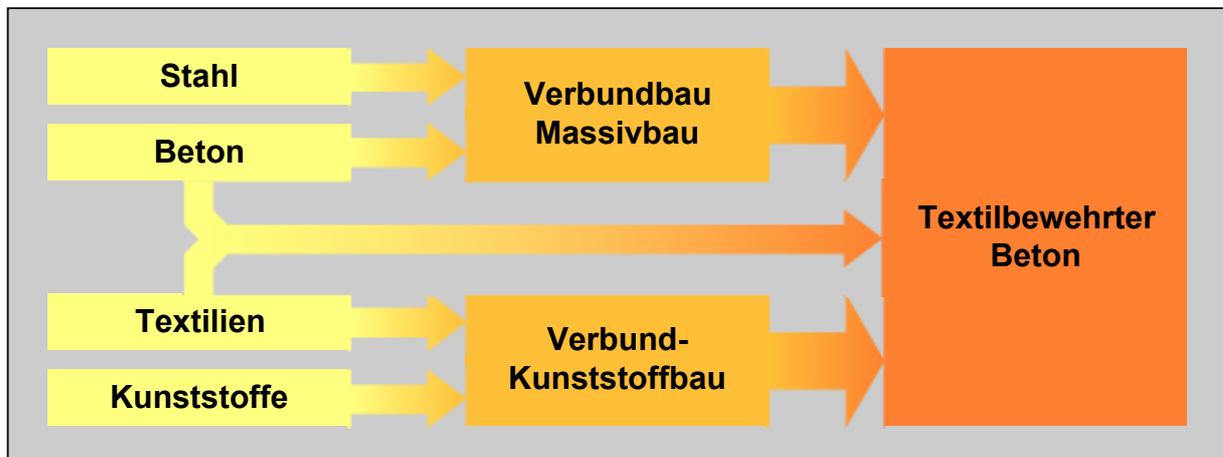


Abbildung 2-3: Verbundbauweisen

Stahlbeton

Beton ist nach wie vor der preisgünstigste Baustoff zur Abtragung von Druckkräften. Die für den Einsatz in zug- und biegebeanspruchten Tragwerken notwendige Zugfestigkeit wird durch den Einbau von Stahleinlagen erreicht. Um diese gegen Korrosion zu schützen sind mindestens 20 mm bis 40 mm dicke Betondeckungen erforderlich, die nicht für die Lastabtragung genutzt werden können. Durch die Substitution des Betonstahls mit korrosionsunempfindlichen textilen Bewehrungselementen ist eine Reduktion dieser Betonschicht auf 8 mm bis 10 mm möglich. Es können somit dünnwandigere Bauteile bei gleichbleibender Tragfähigkeit hergestellt werden [25].

Kurzfaserbeton

Seit langem werden dem Frischbeton Kurzfasern zur Behinderung der Ausbreitung von Rissen während der Erhärtung und zur Erhöhung der Duktilität beigemischt [23]. Mit der willkürlichen, dreidimensionalen Verteilung kurzer Fasern in der Matrix wird ein räumlicher Verstärkungseffekt erzielt. Der Wirkungsgrad der ungerichteten Fasern ist allerdings deutlich geringer als bei einer zwei- oder eindimensionalen Anordnung in Richtung der Zugspannungen, da nur ein geringer Anteil der Fasern traglaststeigernd wirksam werden kann. So verursachen die bei herkömmlichen

Kurzfaserbetonen üblichen Fasergehalte von 3 Vol.-% bis 6 Vol.-% nahezu 90 % der Kosten. Durch den Einbau von textilen Bewehrungselementen kann die notwendige Menge an hochpreisigen Fasern optimiert werden und die Kosten gesenkt werden [24].

Faser-Verbund-Kunststoffe

Eine weitere entwicklungstechnische Grundlage stellen die Faser-Verbund-Kunststoffe (FVK) dar. Diese „maßgeschneiderten“ Werkstoffe, die seit etwa zwanzig Jahren in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden, bestehen aus polymeren Kunststoffmatrices und Aramid-, Glas- oder Kohlenstofffasern zur Verstärkung. Sie zeichnen sich durch hohe einstellbare Zugfestigkeit und Steifigkeit, einen hohen Korrosionswiderstand gegen äußere Angriffe, geringes Gewicht und antimagnetisches Verhalten aus.

Die mechanischen Eigenschaften dieses Verbundbaustoffs werden zum einen von den eingesetzten Fasern bestimmt, die folgende Grundanforderungen erfüllen müssen:

- hohe Zugfestigkeit
- ausreichend hoher Elastizitätsmodul
- möglichst große Bruchdehnung
- geringe Relaxation bei hohem Dauerzug
- geringes Gewicht
- ausreichende Medienbeständigkeit bis hin zur völligen Korrosionsbeständigkeit und Röntgentransparenz

Die zweite eigenschaftsbildende Komponente ist die Matrix aus duromeren Harzsystemen, die der Fixierung der Fasern an gewünschter Stelle, der Kraftübertragung auf die Faser sowie der Stützung und dem Schutz der Fasern dient. Im Bauwesen werden Elemente aus FVK als Bewehrungsstäbe, Zug- und Spannglieder sowie als Erd- und Felsanker eingesetzt [24].

Die Erfahrungen des Verbundkunststoffbaus mit der Herstellung und dem Einsatz von technischen Textilien zur Herstellung filigraner Tragstrukturen sind eine weitere

wichtige Grundlage für die Entwicklung des Textilbetons. Im Gegensatz zu den bewusst sehr kompakt gestalteten Verstärkungstextilien für Faserverbundkunststoffe mit polymerer Matrix ist bei den textilen Bewehrungen für zementgebundene Matrices eine sehr viel „offenmaschigere“ Struktur der Textilien erforderlich [23].

Aus den überwiegend positiven Erfahrungen mit diesen Werkstoffen entstand der Gedanke, textile Strukturen als tragende Bewehrung mit dem Ziel der Eigenschaftsverbesserung und der Kostenoptimierung einzusetzen.

Erste Versuche zur Entwicklung von textilbewehrtem Beton wurden 1995 an der TU Dresden sowie der RWTH Aachen unternommen [24].

Aufgrund der erfolgsversprechenden Ergebnisse wurde im Juli 1999 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) an der RWTH Aachen der Sonderforschungsbereich SFB 532 eingerichtet. Der Zusammenschluss von insgesamt sechs Lehrstühlen aus den Bereichen Bauingenieurwesen, Maschinenbau und Naturwissenschaften ermöglicht eine umfassende, interdisziplinäre Erschließung des Forschungsgebietes.

2.4.3 Textile Werkstoffe

Textile Werkstoffe bilden, analog zu den Bewehrungsstählen des Stahlbetons, die verstärkende Komponente des Verbundbaustoffs Textilbeton.

2.4.3.1 Herstellung

Für die Produktion von technischen Textilien bildet die Faser (Filament) die kleinste makroskopische Einheit [12]. Sie wird aus verschiedenen Ausgangsstoffen hergestellt, über die Kapitel 2.4.3.2 einen Überblick gibt.

In einem weiteren Produktionsschritt werden die einzelnen Filamente zu Faserbündeln zusammengefasst. Diese so genannten Rovings bestehen aus einigen hundert bis einigen tausend Elementfasern und weisen einen Durchmesser von 12 μm bis 30 μm auf [28]. Die Verarbeitung der Einzelfasern zu Bündeln wird in Kapitel 2.4.3.3 vorgestellt.

An letzter Stelle des Herstellungsprozesses steht die Kombination der Garne zu Geweben, Geflechtem, Maschenwaren, Gelegeten oder Vliesstoffen. In Kapitel 2.4.3.4 werden diese textilen Grundstrukturen näher beschrieben.

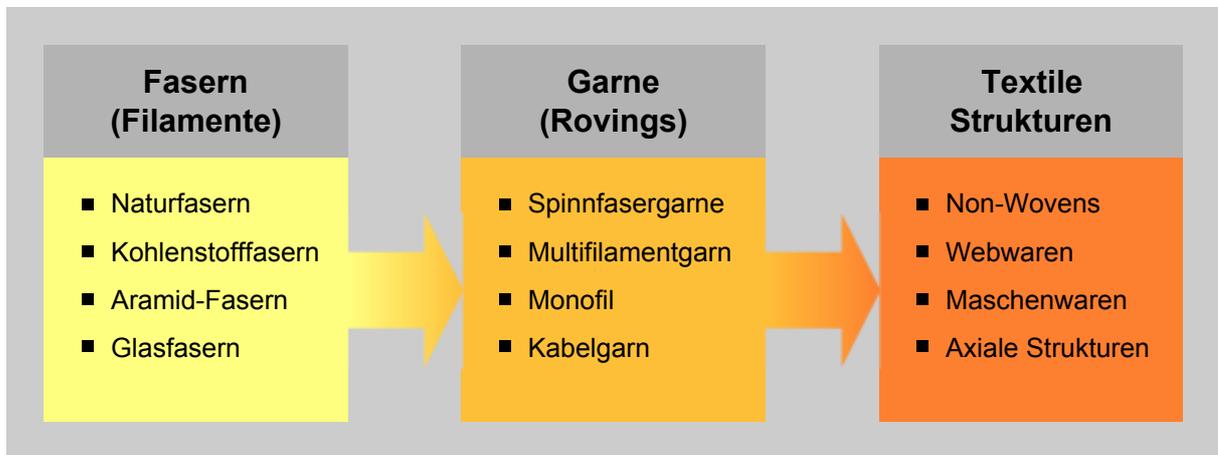


Abbildung 2-4: Herstellungsprozess von technischen Textilien

Ausgewählte Begriffe aus der Textiltechnik werden in Kapitel 12 definiert.

2.4.3.2 Fasern

Im Bauwesen werden zur Herstellung von Textilien vornehmlich folgende Fasern verwendet:

(1) Naturfasern

Die Naturfasern werden in die drei Hauptgruppen pflanzliche, tierische und mineralische Fasern gegliedert, wobei die pflanzlichen und tierischen Fasern im Sinne einer tragenden Bewehrung im Bauwesen keine Rolle spielen [24].

Wegen seiner hohen Temperaturbeständigkeit, der Feinheit seiner Fasern und auf Grund von Kostenvorteilen gegenüber anderen Naturfasern galt Asbest bis zur Entdeckung der krebserregenden Wirkung von Asbestfeinstaub und asbesthaltigem Feinstaub als der bedeutendste mineralische Faserwerkstoff [24].

(2) Chemiefasern

Unter dem Begriff Chemiefasern werden industriell hergestellte textile Faserstoffe bzw. Textilfasern zusammengefasst, die in natürliche Polymere, synthetische Polymere und anorganische Stoffe unterteilt werden können [24].

Fasern aus natürlichen Polymeren werden gegenwärtig nicht als Bewehrungsmaterial für Beton industriell genutzt [24].

Den größten Anteil an Chemiefasern besitzen zurzeit Fasern aus synthetischen Polymeren. Ihre wichtigsten Vertreter sind Polyamid, Polyester und Polyacryl. Sie werden aus Polymeren hergestellt, die durch das Aneinanderreihen von Atomen oder Atomgruppen, sogenannten Monomeren, aufgebaut werden. Die verschiedenen Reaktionsmechanismen bei der Herstellung können Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition sein [24].

Die Herstellungsverfahren für derartige Synthesefasern werden nach der Art der Verflüssigung der Ausgangsstoffe in Lösungsmittelspinnverfahren und Schmelzspinnverfahren eingeteilt. Beim erstgenannten Verfahren wird der Ausgangsstoff unter Verwendung eines Lösungsmittels zur Spinnmasse verflüssigt. Beim Schmelzspinnverfahren hingegen wird zur Herstellung der Spinnmasse Granulat geschmolzen. Die so entstandene flüssige, hochpolymere Verbindung wird anschließend bei beiden Verfahren durch eine formgebende Spinndüse gepresst und erhält durch chemische Reaktionen, Koagulation und Erstarren ihre Faserform [24].

Die für die Verwendung als Betonbewehrung geeignetsten Faserstoffe aus synthetischen Polymeren sind:

(a) Polyesterfasern

Polyesterfasern sind organische Synthesefasern (Plastomere), die als Massenfaser für Bekleidung, Heimtextilien und technische Textilien verwendet werden. Sie besitzen einen teilkristallinen Strukturaufbau und werden typischerweise im Schmelzspinnverfahren aus einer Schmelze aus Polyethylenglykolterephthalat (PETP) hergestellt. Sonnenbestrahlung und Bewitterung führen bei Polyesterfasern zu einem erheblichen Festigkeitsabfall [35].

Tabelle 2-5: Mechanische Eigenschaften von Polyesterfasern nach [35]

Mechanische Kennwerte		Hochverstreckte Fasern
Reißfestigkeit	[10 ³ N/mm ²]	1,35
Dichte	[g/cm ³]	1,38
Zugbrüche	[%]	10 ... 18

(b) Kohlenstoff-Fasern

Kohlenstofffasern werden durch den thermischen Abbau von Polymerfasern (z. B. Polyacrylnitilfasern, PAN), Viskosefasern oder Pech gewonnen. Das gegenwärtig wichtigste Ausgangspolymer ist PAN [24].

Tabelle 2-6 Gibt einen Überblick über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von unterschiedlichen Kohlenstofffasertypen.

Tabelle 2-6: Mechanische Eigenschaften von Kohlestofffasern nach [24]

Mechnische Kennwerte		Hochfeste Fasern (HT)	Intermediate Modul-Fasern (IM)	Hoch-Modul-Fasern (HM)
Durchmesser	[μm]	5 ... 10		
Elastizitätsmodul	[10^3 N/mm^2]	200 ... 250	250 ... 350	350 ... 450
Zugfestigkeit	[10^3 N/mm^2]	3 ... 5	4 ... 5	2 ... 4
Dichte	[g/cm^3]	1,75 ... 1,91		
Wärmeausdehnungskoeffizient	[$10^{-6}/\text{K}$]	axial: -0,1 ... -1,3 radial: 18		

Die besonderen Eigenschaften von Kohlenstofffasern lassen sich wie folgt zusammenfassen [24]:

- hohe Festigkeit, hoher Elastizitätsmodul, sprödes Versagen
- geringe Kriechneigung, geringe Wärmeausdehnung, hohe elektrische Leitfähigkeit
- chemisch inert, hohe Beständigkeit gegenüber Säuren, Laugen und organischen Lösungsmitteln

(c) Aramid-Fasern

Aramid-Fasern sind hochkristalline, organische Chemiefasern, die durch Polykondensation aus aromatischen Polyamiden hergestellt werden [24].

In Tabelle 2-7 sind die wichtigsten mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Aramid-Fasern zusammengestellt.

Tabelle 2-7: Mechanische Eigenschaften von Aramid-Fasern nach [24]

Mechanische Kennwerte		Normale Fasern (N)	Hoch-Modul-Fasern (HM)	Hochfeste Fasern (HT)	Copolymer
Durchmesser	[μm]	10 ... 12			
Elastizitätsmodul	[10^3 N/mm^2]	58	120 ... 146	-	63
Zugfestigkeit	[10^3 N/mm^2]	2,76	2,41 ... 2,76	-	3,4
Bruchdehnung	[%]	3,3	1,5 ... 2,4	3,3	4,5
Dichte	[g/cm^3]	1,44	1,44	-	1,39
Wärmeausdehnungskoeffizient	[$10^{-5}/\text{K}$]	-3,5	-3,5	-	-

Weitere wichtige Merkmale sind [24]:

- hohe Zugfestigkeit in Faserrichtung, geringe Zugfestigkeit quer dazu
- goldgelbes Aussehen, lassen sich nicht färben
- hochgradig empfindlich gegenüber UV-Strahlung (rapider Festigkeitsabfall)

Typische Vertreter sind Kevlar, Arenka und Poly-p-phenylenterephthalamid [35].

(d) Glas-Fasern

Wegen ihrer niedrigen Preise zählen Glasfilamentgarne und Glasstapelfasern zu den wichtigsten Chemiefasern, die zur Verstärkung von Bauprodukten eingesetzt werden. Der Ausgangsstoff Glas zählt zur Gruppe der anorganischen-nichtmetallischen Werkstoffe und wird je nach Zusammensetzung des Glases und Einfügung weiterer Bestandteile als A-Glas, C-Glas, D-Glas, E-Glas und S-Glas bezeichnet. Unter den Sondertypen AR-Glas, Z-Glas und Silikaglas besitzen vor allem im Beton-Verbundbau die speziellen AR-Glasfasern einen großen Stellenwert, da ihre relativ gute Alkaliresistenz (AR = alkaliresistent), bedingt durch einen hohen Zusatz an stabilisierendem Zirkoniumoxid (ZrO_2), einen Einsatz in alkalischen Medien ermöglicht. So werden sie schon seit einigen Jahren zur Kurzfaserbewehrung von Betonbauteilen verwendet [24].

Die günstigen gewichtsbezogenen mechanischen Eigenschaften von Textilglasfasern fasst Tabelle 2-8 zusammen.

Tabelle 2-8: Mechanische Eigenschaften von Glasfasern nach [24]

Glastyp	Dichte	E-Modul	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
	[g/cm ³]	[kN/mm ²]	[kN/mm ²]	[%]
A	2,46 ... 2,48	70 .. 74	3,1	-
AR	2,68 ... 2,70	71 ... 74	3,0 ... 3,5	2,0 ... 4,3
C	2,45 ... 2,52	70 ... 74	3,1 ... 3,4	3,5
D	2,14 ... 2,16	55	2,46 ... 2,5	3,0
E	2,52 ... 2,60	72 ... 77	3,4 ... 3,7	3,3 ... 4,8
R	2,50 ... 2,53	83 ... 87	4,4 ... 4,75	4,1 ... 5,4
S	2,45 ... 2,55	75 ... 88	4,3 ... 4,9	4,2 ... 5,4
Z	2,68	72	3,5	2,4
Silica	2,00	56 ... 66	0,8	1,5

Als mineralischer Werkstoff weisen die Textilglasfasern noch weitere vorteilhafte Eigenschaften auf [24]:

- von Natur aus nicht brennbar
- kein Freisetzen von Dämpfen oder giftigen Gasen unter Hitzeeinwirkung
- Beständigkeit gegenüber Ölen, Fetten, Lösungsmitteln und Säuren

2.4.3.3 Garne

Die verschiedenen Ausgangsstoffe werden mittels unterschiedlicher Verfahren zu endlosen Filamenten oder Spinnfasern mit begrenzter Länge verarbeitet. Da für den Einsatz im Bereich des Textilbetons derzeit hauptsächlich Glasfasern wegen ihrer Beständigkeit im alkalischen Milieu des Betons verwendet werden, soll hier das Verfahren zu ihrer Herstellung exemplarisch für die Produktion von textilen Fäden und Garnen beschrieben werden.

Beim Düsen-Ziehverfahren wird die bis zu 1.550 °C heiße Glasschmelze durch platinlegierte Spinn Düsen gepresst und mittels Hochstreckgeschwindigkeitsziehen zu Filamenten verstreckt. Die anschließend mit Wasser gekühlten Glasfäden werden mit einer wässrigen Suspension aus organischen Filmbildnern, Klebstoffen und Antistatika, der sogenannten Schlichte, benetzt um die Verarbeitung zu erleichtern und Schädigungen der Glasfasern zu vermindern. Das so entstandene Endlos garn wird zur weiteren Verarbeitung aufgespindelt und steht für die Herstellung von textilen Strukturen bereit [28].

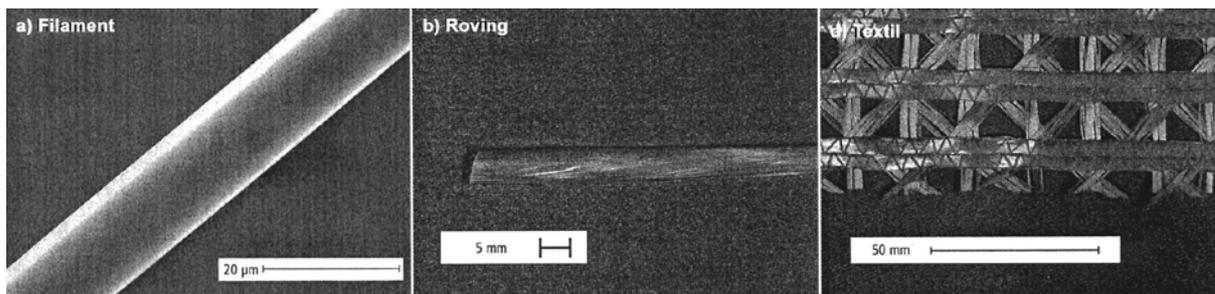


Abbildung 2-5: Stationen der Herstellung eines Gewebes aus Glasfasern [28]

Die zu Bündeln zusammengefassten Fasern bzw. Einzelfilamente werden als „Strand“ bezeichnet. Später werden mehrere dieser Faserbündel zu Garnen, den so genannten „Rovings“, zusammengefasst. Man unterscheidet [35]:

- Spinnfasergarn
- Multifilamentgarn
- Monofil mit Durchmessern $> 0,1$ mm)
- Kabelgarn (nicht gedrehtes Multifilamentgarn)

Spinnfasern müssen zur Weiterverarbeitung durch eine Drehung um die Längsachse zusammengeführt werden. Bei Multifilamentgarnen ist eine Verdrehung nicht zwingend erforderlich aber zur leichteren Weiterverarbeitung üblich. Nach der Verdrehungsrichtung wird in Z- und S-Drehung unterschieden [35].

Die zusammengedrehten Garne werden als Zwirne bezeichnet. Nach der Stufigkeit der Zwirne kann unterschieden werden in [35]:

- Einstufiger Zwirn:
Mehrere Garne werden in einem Drehvorgang miteinander verdreht
- Mehrstufiger Zwirn:
Im Zwirnvorgang werden nicht einzelne Garne, sondern mehrere Zwirne miteinander verdreht.

Schließlich können Fasern, Garne und Zwirne unter dem Oberbegriff Fäden subsummiert werden [35].

Für die Herstellung textiler Bewehrungselemente werden derzeit vornehmlich Multifilamentgarne aus AR-Glasfasern verwendet. Sie bestehen aus mehreren Strängen von je etwa 100 Elementarfasern, die einen Durchmesser im Bereich von 15 µm bis 25 µm und Festigkeiten von über 2.000 N/mm² aufweisen. [15]

Tabelle 2-9 gibt einen Überblick über Rovings der Hersteller Nippon Electric Glass (NEG) und Vetrotex/Saint Gobbin (VET) – vormals CemFIL.

Tabelle 2-9: Eigenschaften von Filamenten und Rovings aus AR-Glas nach [15]

Bezeichnung	Feinheit [tex]	Filament			Roving
		Anzahl []	Durchmesser [µm]	Festigkeit [N/mm ²]	Festigkeit [N/mm ²]
NEG-ARG155	155	400	13,60	2.134	1.094
NEG-ARG310	310	800	12,94	2.271	1.357
NEG-ARG620-01	620	1.600	12,76	2.076	1.341
NEG-ARG620-02	620	1.600	12,96	2.079	761
NEG-ARG1100	1.100	2.000	15,14	2.061	574
NEG-ARG2500	2.500	2.000	23,05	1.574	444
VET-ARG320	320	800	13,50	2.288	1.409
VET-ARG620	620	1.600	13,67	2.184	1.476
VET-ARG1200	1.200	1.600	19,30	1.936	1.400
VET-ARG2400	2.400	1.600	25,28	2.096	1.211

Auffällig ist, dass die Festigkeiten der Rovings deutlich unter denen der Filamente liegen. ABDKADER ET AL. begründen dies mit unterschiedlichen Prüfbedingungen für Filament und Garn sowie großen Streuungen der Filamentfestigkeiten in Längs- und Querrichtung eines Rovings. [15]

2.4.3.4 Flächige Textilstrukturen

Mit Hilfe unterschiedlicher flächenbildender Technologien werden in weiterer Folge die Fäden zu zweidimensionalen Textilien verarbeitet.

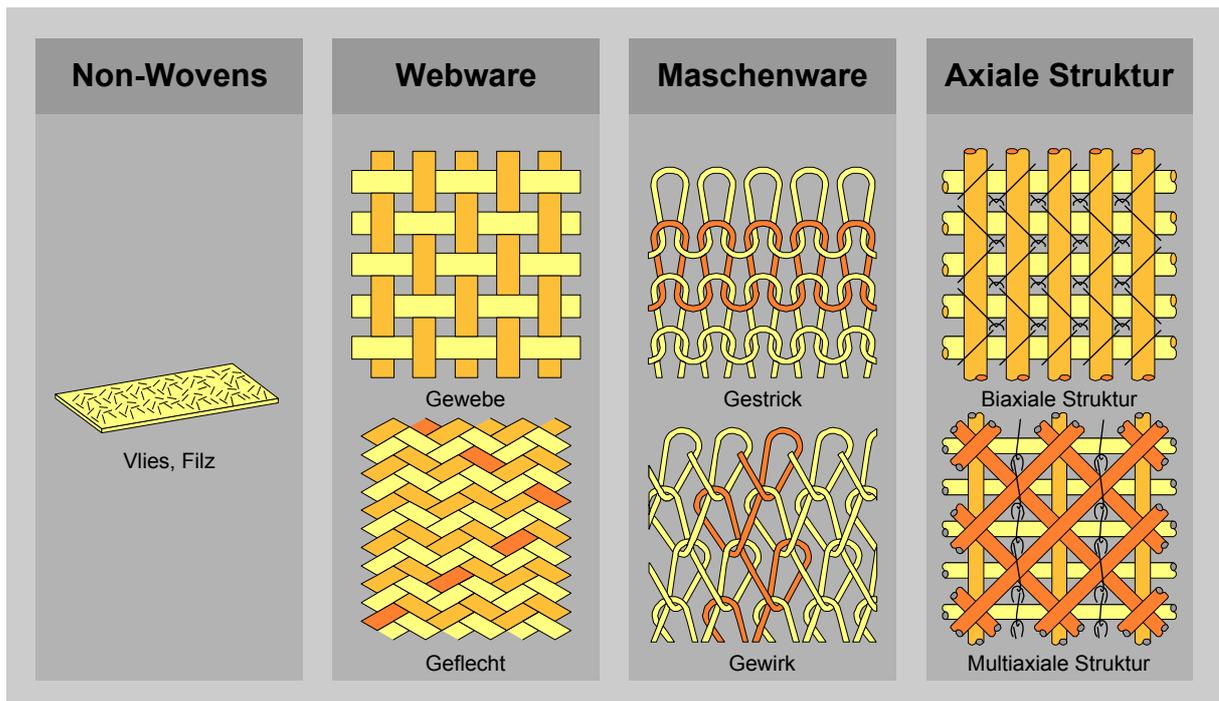


Abbildung 2-6: Grundstrukturen von Textilien nach [23]

(1) Non- Wovens

Alle nicht mit Hilfe maschenbildender Technologien stabilisierten Textilien werden unter dem Begriff Non-Wovens zusammengefasst [35].

(a) Vliese

Vliesstoffe sind mittels verschiedenster Verfahren verfestigte, lose zusammenhängende Fasern oder Elementarfäden. Beispiele für die angewendeten mechanischen und chemisch/thermischen Verfestigungsverfahren sind das Wasserstrahlverfahren für die Vliesbildung/-verfestigung oder das Spinnvliesverfahren [23].

Anwendung finden z. B. Matten aus Vliesstoffen als Kurzfaserverstärkungen in Betonbauteilen. Schichtenweise eingebracht übernehmen sie die gleiche Funktion wie beigemischte Kurzfasern, sparen aber durch die gezielte Platzierung Material ein [23].

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Bauteilfertigung, bei der sie zur gleichmäßigen Betonentwässerung eingesetzt werden und so eine Verbesserung der Oberflächenqualität bewirken [24].

(b) Filze

Durch Walken unter Einwirkung von Wärme, Wasser und Seife verfestigte Textilerzeugnisse aus Wolle oder anderen Tierhaaren sind bislang für Bauanwendungen ohne Bedeutung [35].

(2) Webwaren**(a) Gewebe**

Die DIN 60000 definiert Gewebe als Textilien, die aus rechtwinklig kreuzenden Fäden zweier Fadensysteme, Kette und Schuss, hergestellt sind [23].

Die in Kett- und Schussrichtung orthogonal angeordneten Fäden sind nicht vollständig gestreckt, sondern aufgrund der Abbindungen der Fäden gewellt. Daraus ergibt sich für derartige biaxiale Gewebe eine im Vergleich zu den Einzelfäden reduzierte Festigkeit und Steifigkeit [23].

Außerdem weisen sie nur eine orthotrope Verstärkungswirkung in den senkrecht zueinander stehenden Vorzugsrichtungen der Fäden auf. Eine quasiisotrope Wirkungsweise kann nur durch mehrere übereinanderliegende, gegeneinander verdrehte Gewebelagen erzielt werden [23].

Für den bautechnischen Einsatz geeignete Gewebe sind: Flachgewebe (z. B. als Putzarmierung), Mehrlagengewebe, Abstandsgewebe, 3D-Gewebe, räumliche Gewebe [23].

Abbildung 2-7 zeigt eine Auswahl der gebräuchlichsten Bindungsarten von Geweben.

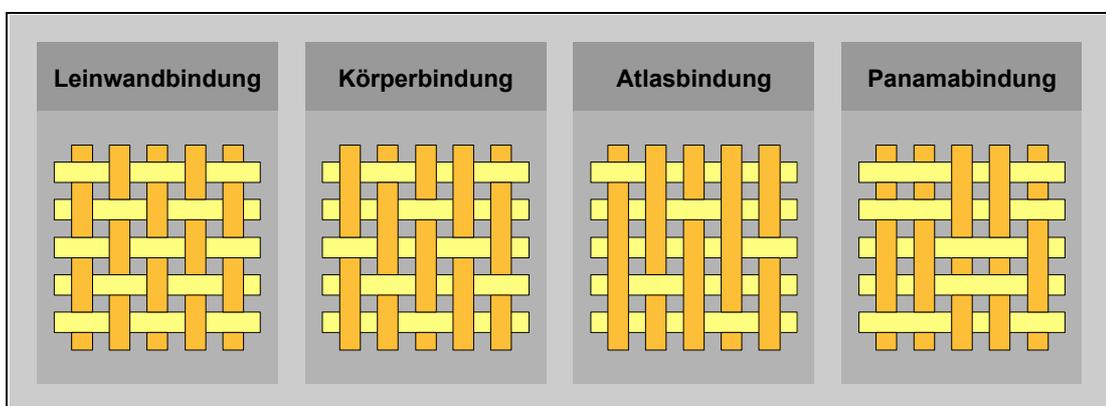


Abbildung 2-7: Bindungsarten von Geweben nach [35]

(b) Geflechte

Obwohl Geflechte bei der Herstellung von Textilbeton noch nicht angewendet wurden, stellen sie durch die Möglichkeit der Erzeugung sehr variabler Strukturen eine interessante Zukunftsperspektive dar [23].

Es handelt sich um flächige oder räumliche Strukturen mit regelmäßiger Fadendichte und geschlossenem Warenbild. Der Faserverlauf kann durch einen variablen Kreuzungswinkel den jeweiligen Anforderungen angepasst werden und bietet so die Möglichkeit, dreidimensionale Fadenstrukturen in einer bauteilgerechten Querschnittsgeometrie herzustellen [23].

(3) Maschenwaren

Unter dem Begriff Maschenwaren werden alle Textilien zusammengefasst, die durch Maschenbildung hergestellt werden. Obwohl konventionelle Maschenwaren nur begrenzte Steifigkeiten und Festigkeiten aufweisen sind sie durch ihre Flexibilität und Drapierbarkeit für die Herstellung von faltenfreien, komplexen Geometrien sehr gut geeignet [23].

Nachteile von Maschenwaren sind die vergleichsweise hohen Verformungen bei noch niedrigem Belastungsniveau und das mögliche Totalversagen bei Ausfall eines Einzelfadens [35].

(a) Gestricke

Flach- oder Rundgestricke sind textile Flächengebilde, die durch Schleifenmaschenbildung aus einem in Maschinenrichtung verarbeiteten Fadensystem erzeugt werden. Für den Einsatz in technischen Bereichen gibt es bereits eine Vielzahl an textiltechnischen Lösungen [24].

(b) Gewirke

Gewirke sind elastische oder dimensionsstabile Maschenwaren mit offener oder geschlossener Struktur. Das bei der Herstellung angewandte Ketten- oder Nähwirken ist bei weitem das flexibelste Verfahren zur textilen Flächenbildung, das die Produktion sowohl flacher als auch schlauchförmiger oder dreidimensionaler Textilstrukturen ermöglicht [36].

(4) Axiale Strukturen

Richtungsorientierte Strukturen bestehen aus gestreckt liegenden Fäden, die absolut parallel verlaufend in bestimmbar Winkeln in die Strukturen eingelegt werden. Die Stoffeigenschaften können durch die gezielte Fadenorientierung in der jeweils erforderlichen Richtung exakt eingestellt werden.

(a) Gelege

Gelege entstehen durch Aufeinanderlegen von Fadensystemen mit oder ohne Fixierung der Kreuzungspunkte. Je nach Orientierung der Fäden und Vorhandensein einer Fixierung wird unterschieden in unidirektionale (UD) und multiaxiale Gelege [23].

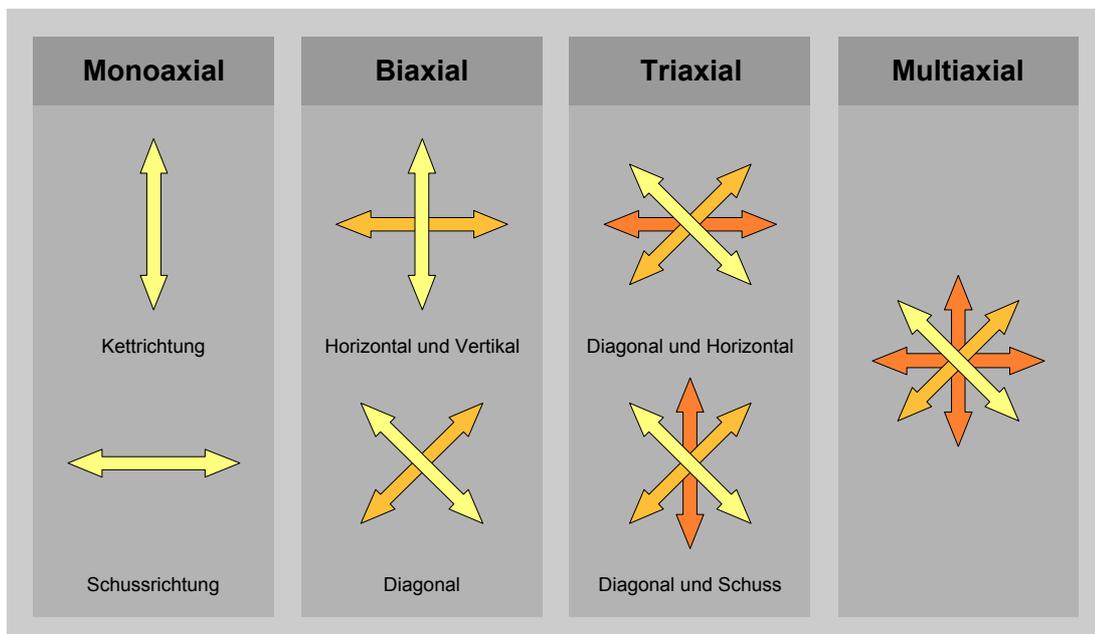


Abbildung 2-8: Ausführungen richtungsorientierter Strukturen nach [36]

Die parallel liegenden, vollständig gestreckten Fadenscharen der UD-Gelege sind nicht miteinander verbunden und werden deswegen im nichtimprägnierten Zustand mit Matrixmaterial vorimprägniert, um einen Zusammenhalt der Schichten herzustellen [23].

Die multiaxialen Gelege hingegen weisen stoff-, form- oder kraftschlüssig miteinander verbundene Fadenlagen auf [23].

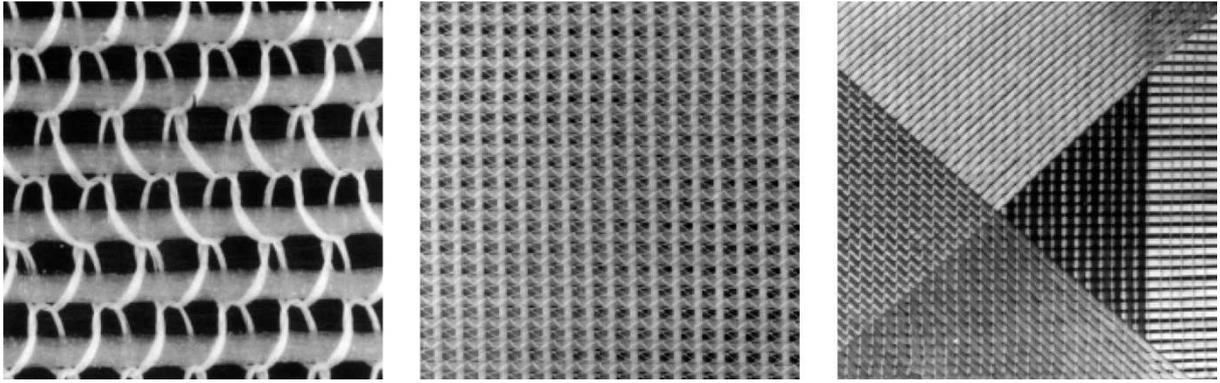


Abbildung 2-9: Axiale Gelegestrukturen

Vor allem multiaxiale Gelegestrukturen eignen sich aufgrund ihrer hohen Dimensionsstabilität in allen Richtungen, der isotropen Kraftlinienverteilung und dem gleichmäßigen Dehnungsverhalten besonders zur Verstärkung von Werkstoffen [36]. Nähgewirkte Variable Gelege (NVG) sowie Verwirkte Multiaxiale Gelege (WIMAG) wurden bereits erfolgreich als Betonbewehrung eingesetzt [23].

2.4.3.5 Dreidimensionale Textilstrukturen für dünnwandige Bauteile

Die Entwicklung neuartiger Produktionsmaschinen und Herstellungsprozesse ermöglicht seit kurzem die direkte Fertigung bauteilgerechter Verstärkungstextilien mit dreidimensionaler Ausdehnung. Durch die endkonturnahe Gestaltung der 3D-Textile während des Herstellungsprozesses entfällt die Notwendigkeit nachträglicher umformender Maßnahmen. Diese im so genannten Direktherstellungsverfahren gefertigten Verstärkungshalbzeuge gewinnen zunehmend an Bedeutung, da mit derartigen Textilien in beliebigen Betonquerschnitten oberflächennah durchgängige Bewehrungen mit einem einzigen textilen Halbzeug eingebracht werden können [14].

Für bautechnische Anwendungen sind vor allem die räumlichen Abstands- und Konturengewirke von Bedeutung. Abstandsgewirke sind Textilien mit parallel zueinander stehenden, biaxial verstärkten Deckflächen, die durch Polfäden miteinander verbunden sind. Konturengewirke weisen zusätzlich noch einen variablen Querschnitt auf [23].

2.4.3.6 Ausrüstung

Für die diversen Einsatzbereiche müssen die textilen Rohwaren einer Weiterbehandlung unterzogen werden. Diese erfolgt generell in zwei Schritten.

(1) Vorbehandlung

Die für die Produktion der Fäden benötigte Schlichte wird ausgewaschen und ein Haftvermittler aufgetragen [35].

(2) Beschichtung

Die vorbehandelte Rohware wird mit einer Plastomerbeschichtung versehen. Nach Art der Beschichtung können folgende Systeme unterschieden werden:

(a) PVC-Beschichtung

Eine preisgünstige Variante ist die Beschichtung mit Polyvinylchlorid (PVC). Eine vorgemischte Paste aus PVC-Pulver, Plastisolen (Weichmacher), Hitze- und Lichtstabilisatoren, Fungiziden, Bakteriziden und Pigmenten wird mittels Streich- oder Kalanderverfahren bei Temperaturen von ca. 120 °C bis 200 °C aufgetragen.

PVC-Beschichtungen werden üblicherweise auf Polyester-Gewebe, seltener auf Aramidgewebe aufgetragen [35].

(b) PTFE-Beschichtung

Das Rohgewebe wird durch eine Dispersion aus feinsten Polytetrafluorethylen-Teilchen in wässriger Phase gezogen. Anschließend wird das Wasser verdampft und die PTFE-Partikel bei 327 °C gesintert.

Durch derartige Beschichtungen können Textilien hochgradig antiadhäsiv, d.h. selbstreinigend gemacht werden [35].

(c) Silikonbeschichtung

Silikonbeschichtete Textilien zeichnen sich durch eine sehr hohe UV-Beständigkeit, sehr gute Witterungsbeständigkeit, hohe Flexibilität und hohe Transparenz aus.

Nachteilig sind das kritische Brandverhalten sowie die Tatsache, dass Verbindungen nur über Verkleben, nicht aber durch Verschweißen möglich sind.

2.4.4 Feinbeton

Die zweite Komponente des Verbundwerkstoffs Textilbeton bilden speziell auf die Anforderungen der textilen Werkstoffe abgestimmte Feinbetone.

2.4.4.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die Matrix werden grundsätzlich von der Art und Gestalt der verwendeten Textilien, den Verbundmechanismen sowie den Herstellungsprozessen bestimmt [34]. Um textile Strukturen in Bauteile aus Beton integrieren zu können muss die Betonmatrix folgende Eigenschaften aufweisen [12]:

- an den Gitterabstand der Textilien angepasstes Größtkorn der Gesteinskörnung
- fließfähige Matrix um eine Durchtränkung der Textilien und einen guten Verbund zu gewährleisten
- auf den Herstellungsprozess abgestimmte Frischbetoneigenschaften
- niedrige Alkalität bei Verwendung von Textilien aus Glasfasern

2.4.4.2 Ausgangsstoffe

(1) Zuschlag

Aufgrund der Engmaschigkeit textiler Strukturen (Garnabstand kleiner 5 mm) kommen für zementgebundene textilverstärkte Bauteile ausschließlich Feinsande mit einem Größtkorn von 1 mm, in den seltensten Fällen Grobsande mit einem Größtkorn von bis zu 4 mm, zum Einsatz. Zur Erhöhung des Anteils der Kornfraktionen kleiner 125 µm wird zusätzlich inertes Quarzsteinmehl beigefügt.

In Deutschland wurden bislang gute Erfahrungen mit hohen Zuschlagsanteilen gemacht. Dabei hat sich ein Massenverhältnis des Zuschlags zum Zement von 1:1 bis 1:2 bewährt [24].

(2) Bindemittel

Gegenwärtig werden aufgrund des geringeren Preises und des besseren Verbundverhaltens hauptsächlich Textilien aus Glasfasern für die Herstellung von Textilbeton eingesetzt. Ihre Beständigkeit wird maßgebend von der Alkalität und dem

Calciumhydroxidangebot der Bindemittelmatrix beeinflusst. Das hohe alkalische Milieu von Feinbetonen auf Basis von Portlandzementen (pH-Werte zwischen 13 und 14 im unkarbonatisierten Zustand) führt langfristig zu einem Abfall der Festigkeiten und einer Verringerung der Verformungsfähigkeit des Verbundwerkstoffs. Auf den schädigenden Einfluss des Feinbetons auf die textile Bewehrung wird in Kapitel 2.4.5.3 detailliert eingegangen.

Eine Reduktion der Alkaliionenkonzentration sowie des Calciumhydroxidangebots wird durch eine Verringerung des Portlandzementklinkergehalts erreicht, indem der hoch alkalische Zement durch Hüttensand, natürliche oder künstliche Puzzolane, wie z.B. Steinkohlenflugasche und Silikastaub, ersetzt wird [12].

Eine weitere Alternative stellt die Kombination von Portlandzement mit Tonerdeschmelz-, Calciumphosphat- oder Sulfathüttenzement bzw. der Einsatz von polymermodifiziertem Zement dar [34].

(3) Zusatzstoffe

(a) Mikrosilika

Durch die Zugabe von Silikastaub kann die Konzentration der Alkaliionen gesenkt und der Calciumhydroxidgehalt reduziert werden [12].

Bei der puzzolanischen Reaktion des Mikrosilikas $[\text{SiO}_2]$ wird das bei der Zementhydratation abgespaltene Calciumhydroxid $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ zu festigkeitsbildenden Calciumsilikathydrat-Phasen [CSH] umgewandelt und dadurch das alkalische Milieu der Porenlösung gesenkt [6].

In Abhängigkeit vom jeweiligen WB-Wert ist für einen vollständigen Abbau des Calciumhydroxids in Mischungen mit Portlandzement die Zugabe von ca. 15 bis 25 M.-% Mikrosilika, bezogen auf den Bindemittelgehalt, erforderlich [12].

Untersuchungen haben gezeigt, dass durch eine Zugabe von 25 M.-% Mikrosilika der pH-Wert des Feinbetons auf bis zu 12,5 gesenkt werden kann. Allerdings verursachen derart hohe Dosierungen unter anderem verstärktes chemisches Schwinden sowie eine erhebliche Beeinträchtigung der Fließfähigkeit. Daher empfiehlt sich eine Begrenzung der Zugabemenge auf maximal 5 % bis 10 % [34].

(b) Polymere

Ein weiterer Ansatz zur Verringerung der schädigenden Einflüsse auf das Fasermaterial ist die Beimengung von Kunststoffzusätzen. Durch die Modifikation

des Feinbetons mit einer polymeren Phase ist es möglich, die Faserbündel vor dem mechanischen Angriff durch Kerbwirkung der Hydratationsprodukte zu schützen. [34]

Des Weiteren können polymere Zusätze das Verbundverhalten verbessern, indem sie die inneren Filamente eines Rovings aktivieren (vgl. Kapitel 2.4.5.1).

Im Rahmen des SFB 532 konnte nachgewiesen werden, dass polymermodifizierte Feinbetone eine erheblich erhöhte Bruchdehnung und –kraft aufweisen.

Für den Nachweis wurde eine speziell für Textilbeton entwickelte Feinbetonrezeptur mit verschiedenen Polymerdispersionen angereichert, deren Kennwerte in Tabelle 2-10 angeführt sind. Die genaue Zusammensetzung der Betonmischungen kann Tabelle 2-11 entnommen werden. [18]

Tabelle 2-10: Kennwerte der Polymerdispersionen nach [18]

Dispersions- bezeichnung	Polymerbasis	Feststoff- gehalt	pH-Wert	Partikel- durchmesser
		[M.-%]		[μm]
Polymer 1	Sytrol-Butadien-Copolymer	48,1	10,5	0,16
Polymer 2	Methyl-methacrylat + Butylacrylat	52,1	7,5	0,15

Tabelle 2-11: Mischungszusammensetzungen nach [18]

		Feinbeton	polymermodifizierter Feinbeton
Zuschlag 0/0,6	[kg/m ³]	714,0	626,0
Quarzmehl	[kg/m ³]	499,0	438,0
Zement	[kg/m ³]	490,0	430,0
Wasser	[kg/m ³]	280,0	246,0
Fließmittel	[kg/m ³]	10,5	4,6
Flugasche	[kg/m ³]	175,0	154,0
Mikrosilika	[kg/m ³]	35,0	31,0
Polymerzusatz	[kg/m ³]	0,0	123,0
Summe	[kg/m ³]	2.203,5	2.052,6
W/B-Wert		0,4	
W/B-Wert		0,0	0,2

In Zugversuchen an taillierten Schulterproben zeigte sich, dass die Bruchlast der mit Polymerdispersion 2 modifizierten Proben um knapp 40 % höher lag als bei den Proben ohne Kunststoffzusatz. Grund hierfür sind einerseits die Ausbildung einer

zusammenhängenden Sekundär-Matrix aus Kunststoff im Betongefüge und die veränderte Morphologie der Hydratationsprodukte andererseits, die eine Verbesserung der Zugfestigkeit sowohl des Betons als auch der textilen Bewehrung bewirkt.

Ein weiterer Aspekt der Polymermodifikation ist die Auswirkung der Kunststoffe auf die Rheologie des Feinbetons. Da Polymerdispersionen überwiegend aus organischen Verbindungen bestehen, die zum Großteil oberflächenaktiv wirksam sind, kann der Fließmittelgehalt polymermodifizierter Mischungen um bis zu 50 % reduziert werden. [18]

2.4.4.3 Mischungsaufbau

Da die Feinbetone nicht eindeutig den bestehenden Normen zugeordnet werden können, sind herkömmliche Entwurfskriterien wie WZ-Werte, Sieblinienbereiche oder ähnliches nicht anwendbar. Beim Mischungsentwurf muss daher bislang empirisch vorgegangen werden [34].

Als Ansatzpunkt seien an dieser Stelle exemplarisch Rezepturen aus der Literatur zitiert, die sich in experimentellen Anwendungen bereits bewährt haben.

Tabelle 2-12: Mischungszusammensetzung ausgewählter Betone nach [12], [28]

	M-01	M-02	M-03	M-04
Zuschlag 0/0,6 [kg/m ³]	714,0	710,0	668,0	510,0
Zement [kg/m ³]	490,0		210,0	510,0
Wasser [kg/m ³]	280,0			255,0
Fliesmittel [M.-%]	7,0	14,0	6,0	10,2
Flugasche [kg/m ³]	175,0		455,0	-
Mikrosilika [kg/m ³]	35,0			-
Polymerzusatz	-			86,7
Quarzmehl [kg/m ³]	500,0	497,0	468,0	1020,0
Summe [kg/m ³]	2.201,0	2.201,0	2.122,0	2.391,9
W/Z-Wert	0,57		-	0,50
W/B-Wert	0,40			-
Druckfestigkeit [N/mm ²]	78,3	68,0	40,3	-
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	9,9	8,9	5,5	-

Alle Rezepturen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 532 an der RWTH Aachen entwickelt. Zur Senkung der Alkaliionenkonzentration und des Calciumhydroxidangebots wurde der Portlandzementgehalt durch Austausch gegen Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Silikastaub reduziert [12]. Bei Mischung M-04

handelt es sich um einen polymermodifizierten Feinbeton, der keine puzzolanischen Zusatzstoffe enthält, dafür mit einer handelsüblichen Polymerdispersion auf Styrolacrylat-Copolymer-Basis angereichert wurde [28].

2.4.4.4 Eigenschaften des Feinbetons

(1) Fließfähigkeit

Grundvoraussetzung für einen optimalen Verbund von Feinbeton und Textil ist eine fließfähige Konsistenz, die eine gute Durchdringung des engmaschigen Textils und ein vollständiges Umschließen der einzelnen Fasern und Rovings ermöglicht. Bei der Optimierung der Feinbetonkonsistenz wird dabei auf die bereits umfangreichen Erfahrungen mit feinkörnigen, selbstverdichtenden Betonen zurückgegriffen.

Da die eingesetzten Feinbetone aufgrund der geringen Korngrößen der Zuschläge (Größtkorn kleiner 4 mm) eher den Mörteln zuzuordnen sind, wird am Frischbeton das Fließmaß in Anlehnung an das Ausbreitmaß gemäß ÖNORM B 3343, Prüfverfahren für Mauer- und Putzmörtel, bestimmt [34].

Um die Konsistenz umfassend beurteilen zu können, wird mit dem Funnel-Trichter zusätzlich die Fließzeit ermittelt, da Betone mit gleichem Fließmaß zum Teil sehr unterschiedliche Konsistenzen aufweisen [34].

An der RWTH Aachen wird zur Zeit ein Prüfverfahren entwickelt, das den Einfluss des Textils auf das Fließvermögen des frischen Feinbetons erfasst. In Anlehnung an den in Japan für selbstverdichtende Betone entwickelten L-Shape-Test wird eine Prüfvorrichtung erstellt, in die unterschiedliche Textilien eingehängt bzw. eingespannt werden. Mit dieser Prüfeinrichtung kann der Einfluss unterschiedlicher Maschenweiten auf das Fließvermögen und die Durchdringung untersucht werden [34].

(2) Alkalität

Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von textildbewehrten Bauteilen ist bei den eingesetzten Feinbetonen ein möglichst geringes Alkalitätsdepot anzustreben, um den in Kapitel 2.4.5.3 beschriebenen Angriff auf die Textildbewehrung zu minimieren.

Eine Steuerung der diesbezüglichen Feinbetoneigenschaften kann über die in Kapitel 2.4.4.2 erläuterte Auswahl bestimmter Ausgangsstoffe erfolgen.

2.4.5 Eigenschaften des Verbundwerkstoffs Textilbeton

2.4.5.1 Verbundverhalten

Neben dem Materialverhalten der Einzelkomponenten Textil und Feinbeton ist vor allem das Verbundverhalten zwischen den Faserbündeln und der Zementmatrix ausschlaggebend für das Tragverhalten von Textilbeton.

Eine direkte Analogie zum Verbundverhalten von Stahlbeton ist nicht möglich, da es sich bei den Faserbündeln um inhomogene Querschnitte handelt, die ein grundlegend anderes Verhalten aufweisen als Betonstahl [12].

Die für die textile Bewehrung verwendeten Rovings bestehen aus einer Vielzahl von Filamenten, die miteinander nicht kraftschlüssig verbunden sind (vgl. Kapitel 2.4.3.3). Aufgrund des nicht vorhandenen inneren Verbundes der einzelnen Fasern werden im Textilbeton die äußeren Belastungen über Verbundkräfte vom Beton auf die äußeren Filamente eines Garns übertragen, die in direktem Kontakt zur Betonmatrix stehen. Die innen liegenden Filamente ohne Matrixkontakt werden über die durch den Verbund zwischen den Filamenten übertragbaren Kräfte an der Lastabtragung beteiligt. [15]

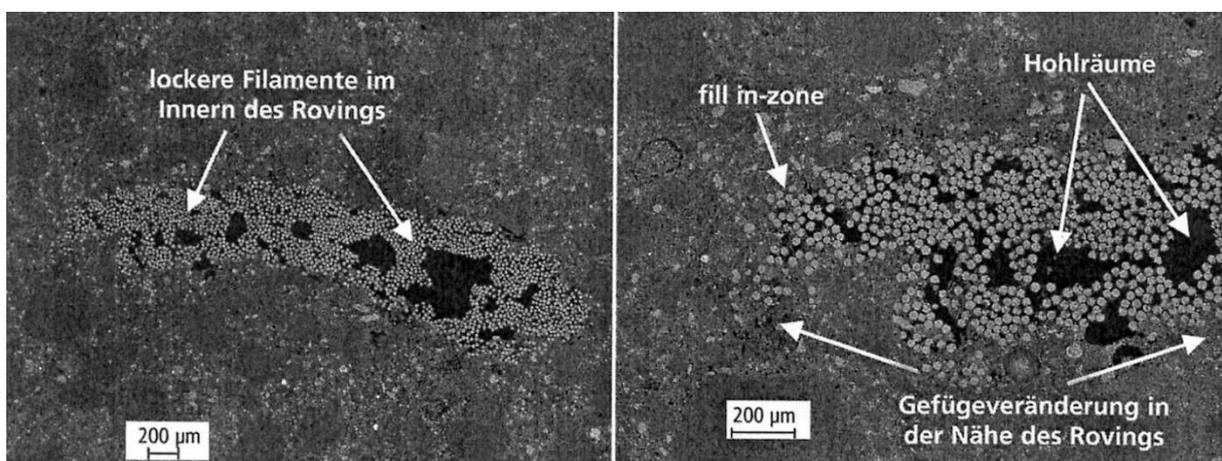


Abbildung 2-10: In Feinbetonmatrix eingebettetes Roving [28]

Aufgrund des Bündelcharakters der Bewehrung ist somit zur Beschreibung des Verbundverhaltens von Textilbeton nicht nur die Wechselwirkung zwischen Filamentmaterial und Matrix zu untersuchen sondern auch die Vorgänge im Inneren des textilen Bewehrungsquerschnitts.

Die textile Bewehrung muss also selbst schon als Verbundwerkstoff betrachtet werden. [15]

(1) Verbund Filament-Matrix

Das Verbundverhalten zwischen Filamentmaterial und Matrix lässt sich durch die Verbundspannungs-Schlupf Beziehung beschreiben, die aus in Pull-Out-Tests (vgl. 2.4.6.1) ermittelten Last-Verformungskurven abgeleitet werden kann. [16]

Abbildung 2-11 zeigt den Verlauf der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung von geripptem Betonstahl. Die Verbundfestigkeit τ setzt sich zusammen aus der Festigkeit des mechanischen Verbunds τ_m und der Festigkeit des Reibungsverbunds τ_f . [17]

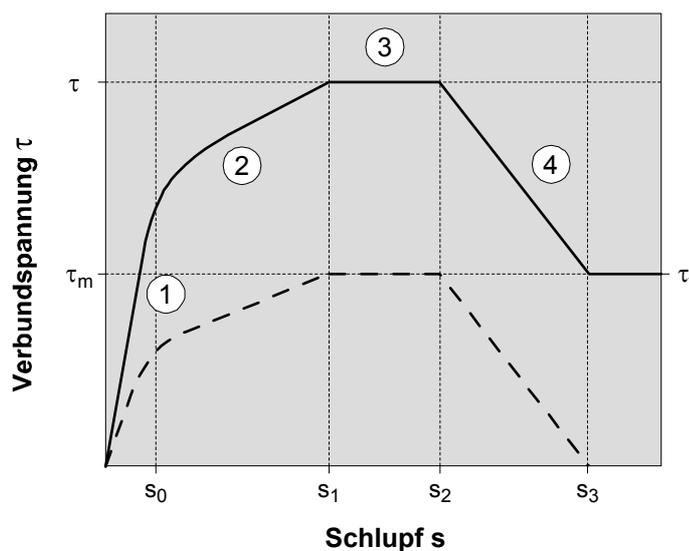


Abbildung 2-11: Verbundspannungs-Schlupf Beziehung nach [17]

Das anfänglich elastische Verbundverhalten (Bereich 1) basiert primär auf der Verzahnung des Stahls und des Betons. Mit zunehmender Belastung nimmt die Steifigkeit des Verbundes ab (Bereich 2) und erreicht ein plastisches Niveau (Bereich 3). Mit zunehmendem Schlupf verursacht die Abscherung des Betons zwischen den Stahlrippen ein Abnahme der Verbundspannung (Bereich 4) bis zum Erreichen des verbleibenden Reibungswiderstands. Durch die hohe Duktilität des

Verbundes (Bereich 3) können in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit zum Teil hohe Spannungen übertragen werden. [16]

Abbildung 2-12 vergleicht exemplarisch den Verlauf der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung von geripptem Betonstahl sowie von AR-Glasfilamenten.

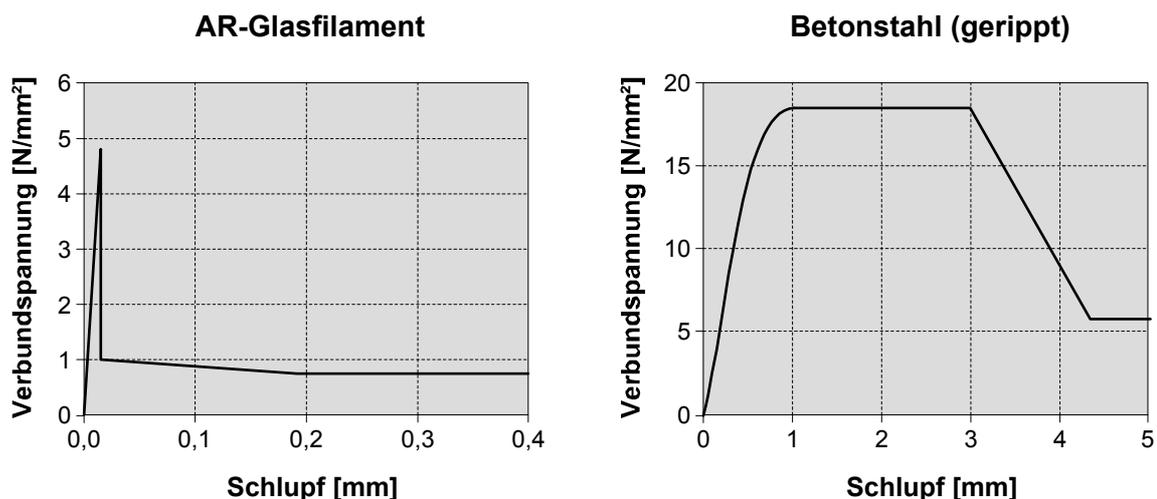


Abbildung 2-12: τ -s Beziehungen für AR-Glas und gerippten Betonstahl nach [16]

Der elastische Verbund zu Belastungsbeginn basiert hier nicht auf mechanischer Verzahnung sondern auf Adhäsion. Die maximal erreichbare Verbundspannung ist deutlich geringer als bei Rippenstahl.

Ein weiterer Nachteil ist die fehlende Duktilität des Verbundes bei größeren Relativverschiebungen. Der irreversible Verlust des adhäsiven Verbundes bei nur geringem Schlupf führt zu einem schlagartigen Abfall der Verbundspannung auf etwa 20 % des Maximalwertes. Die Kraftübertragung erfolgt nur mehr über Reibung auf annähernd konstantem Niveau. Die maximale Verbundspannung wird nur an einer bestimmten Stelle innerhalb der Verankerungslänge erreicht und kann deshalb nicht ausgenützt werden. [16]

(2) Verbund Roving-Matrix

Die Qualität des Verbundes zwischen Roving und Matrix hängt maßgeblich davon ab, wie viele der einzelnen Filamente eines Rovings an der Kraftübertragung beteiligt sind. Je weiter ein Filament im Inneren eines Rovings liegt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es in Kontakt mit der Matrix steht und zum Verbund beitragen kann. Eine Mitwirkung der inneren Filamente ist nur durch die Bildung von so genannten Matrixbrücken möglich. Sie entstehen durch das unregelmäßige Eindringen von flüssigem Zementleim ins Roving oder durch Hydratationsprodukte, die mehr oder weniger zufällig in den Kern des Faserbündels wachsen. [16]

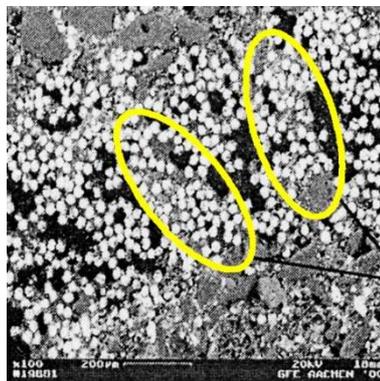


Abbildung 2-13: Ausbildung von Matrixbrücken in einem Roving [16]

Da der Umfang, mit dem die Filamente mit der Matrix in Verbund stehen, im Rovinginneren starken Schwankungen unterliegt, ist eine deterministische Beschreibung des Verbundverhaltens von Rovings nicht möglich. Zur qualitativen und quantitativen Abbildung der streuenden Verbundbedingungen im Rovingquerschnitt werden derzeit numerische Simulationsmodelle entwickelt, welche die gegebenen Verhältnisse vereinfacht beschreiben und langfristig zu praxistauglichen Ingenieurmodellen zur Bemessung von Textilbeton führen sollen. [16]

(a) Haftbrücken- und Bond-Layermodell

Das Haftbrückenmodell nach SCHORN beschreibt die Mitwirkung der Filamente bei der Rissüberbrückung mittels der Verformungslänge L_V zwischen zwei Haftbrücken. Die unterschiedliche Kraftaufnahme der Filamente wird dabei durch eine Zunahme der Verformungslänge vom Rovingäußeren nach innen charakterisiert. [16]

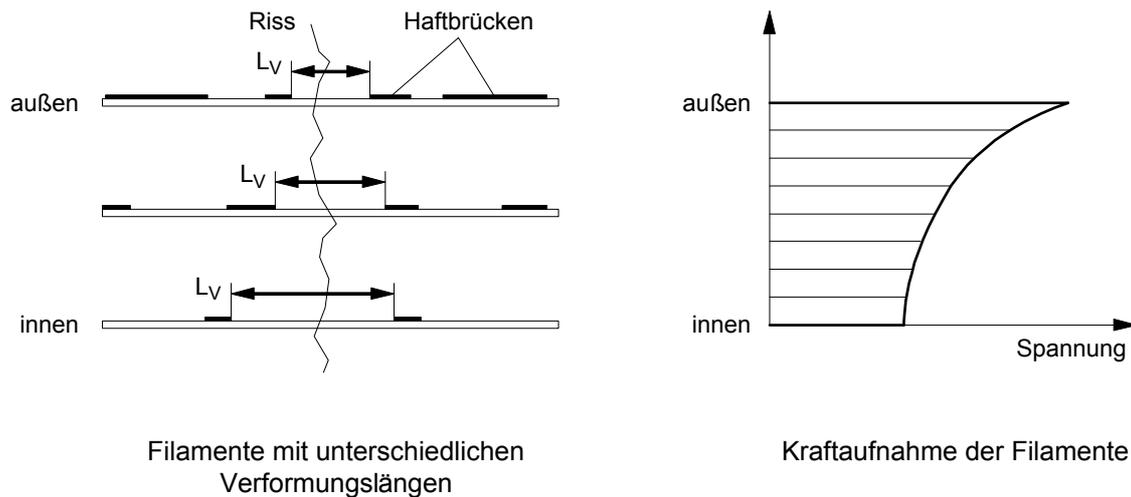


Abbildung 2-14: Haftbrückenmodell Schorn nach [16]

Ähnliche Ergebnisse liefert das Bond-Layermodell, das den Roving in Filamentgruppen („bond layer“) mit unterschiedlicher Verbundqualität einteilt. [16]

Beide Modelle stellen eine geeignete Grundlage zur detaillierten Abbildung des Versagensprozesses des Garns dar, und können zur numerischen Berechnung von Rissöffnungs-Spannungsbeziehungen herangezogen werden. [16]

(b) Modell von Ohno und Hannant

Zur Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Textilbeton haben OHNO & HANNANT ein theoretisches Modell entwickelt, das die Filamente eines Rovings in äußere Filamente mit Matrixkontakt und kontaktlose innere Filamente unterteilt und auf der Annahme konstanter Verbundspannungen basiert. [16]

Es geht davon aus, dass es sowohl an der Grenzfläche zwischen Matrix und äußeren Filamenten als auch der Grenzfläche zwischen äußeren und inneren Filamenten zu Verschiebungen kommt. Ursache hierfür sind die Größenunterschiede der aufnehmbaren Verbundspannungen an den Grenzflächen. Die Matrix-Faser-Grenzfläche kann deutlich höhere Verbundspannungen übertragen als die schwächere Faser-Faser-Grenzfläche, wodurch letztere maßgebend für die Verbundqualität verantwortlich ist. [15]

Mit Hilfe des OH-Modells ist eine realitätsnahe Beschreibung des Verformungsverhaltens von Textilbeton möglich, da es die Inhomogenität des Bewehrungsquerschnitts berücksichtigt und auf die Vorgänge im Inneren eines Rovings eingeht.

2.4.5.2 Tragverhalten

Das Verformungsverhalten von textildbewehrtem Beton bei Zugbelastung ist mit dem von Stahlbeton vergleichbar und lässt sich wie dieses in drei charakteristische Bereiche unterteilen:

- **Zustand I**

Der Beton ist zunächst ungerissen, die Spannungs-Dehnungs-Linie weist einen sehr steilen Anstieg auf. [15]

Die eingeleitete Kraft wird bei geringer Dehnung hauptsächlich durch den Beton aufgenommen. Die Steigung des linearen Anstiegs repräsentiert den E-Modul des Betons. [18]

- **Zustand IIa**

Versagt der Beton an seiner schwächsten Stelle, kommt es zur Erstrissbildung und die Bewehrung übernimmt die Kraftaufnahme im Riss. [18]

Die Steifigkeit fällt sehr stark ab und weitere Risse bilden sich. [15]

- **Zustand IIb**

Gegen Ende der Rissbildung steigt die Gradienten der Spannungs-Dehnungs-Linie wieder an und wird bis zum vollständigen Riss durch den E-Modul der Textildbewehrung bestimmt. Nach Abschluss der Rissbildung verläuft die σ - ε -Linie parallel zur jener der Bewehrung. [15], [18]

Bei optimalem Verbund zwischen den Filamenten, wird die Garnzugfestigkeit erreicht und die Garne versagen. Dieser Wert wird mit textilen Bewehrungen, die keinen Verbund der inneren Filamente aufweisen, nicht erreicht, da im Wesentlichen nur die äußeren Filamente die Kraft aufnehmen. [18]

Da das Bewehrungsmaterial kein Fließvermögen aufweist, unterscheidet sich dieser Zustand vom Zustand III des Stahlbetons. [15]

Die vorangehenden Überlegungen gelten für mit fertigen Textilien bewehrte Zugkörper und sind für praxisrelevante Aussagen über die Gebrauchs- und

Tragfähigkeit des Verbundwerkstoffs ausreichend. Sie enthalten jedoch derzeit noch nicht quantifizierbare, schädigende Einflüsse der textilen Herstellungsverfahren sowie der Betonieretechnologie auf die Festigkeit der textilen Bewehrung.

Zur Entwicklung eines konsistenten Modells für Textilbeton ist daher die Untersuchung von mit reinen Rovings bewehrten Proben erforderlich, bei denen diese festigkeitsmindernden Faktoren unberücksichtigt bleiben können. [16]

Wie stark sich diese Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Textilbeton auswirken zeigt Abbildung 2-15, die den Vergleich der Spannungs-Dehnungsbeziehungen einer textilbewehrten Probe und einer mit Rovings bewehrten Probe darstellt.

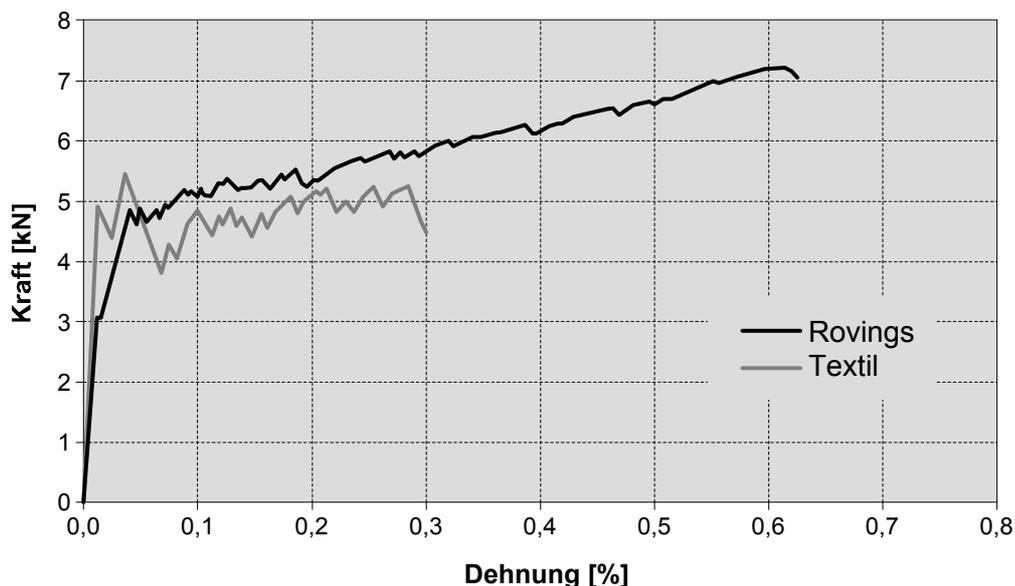


Abbildung 2-15: Vergleich von Zugversuchen an Textilien und Rovings nach [16]

Beide Kurven weisen im ungerissenen Zustand I annähernd den gleichen Anstieg auf. Auch die Lastaufnahme während der Rissbildungsphase verläuft annähernd parallel. Es zeigt sich aber, dass sich die Rissbildungsphase bei der mit Rovings bewehrten Probe über einen doppelt so großen Dehnungsbereich erstreckt und zu einem im Bruchzustand sehr fein verteiltem Rissbild führt.

Die Maximalkraft der mit dem fertigen Textil bewehrten Probe liegt deutlich unter jener der rovingbewehrten, die Zugfestigkeit der eingelegten Textilien wird nicht voll ausgenutzt. [16]

HEGGER ET AL. haben in umfangreichen Versuchsreihen an mit Glasfasertextilien bewehrten Dehnkörpern versucht die verschiedenen Einflussgrößen zu quantifizieren.

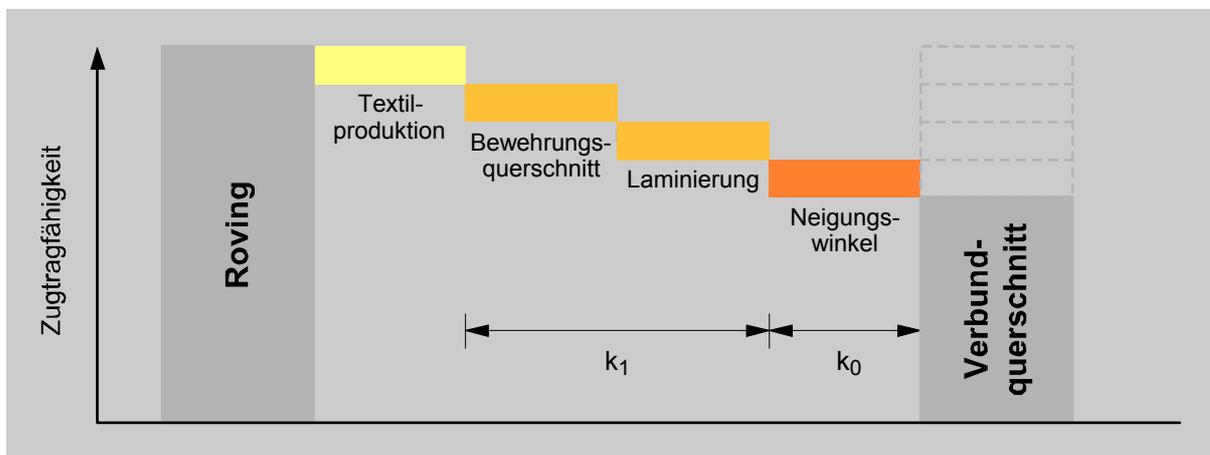


Abbildung 2-16: Einflüsse auf die Tragfähigkeit eines Verbundquerschnitts

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit den in Kapitel 2.4.6.2 beschriebenen Prüfverfahren an bidirektionalen Gelegen aus AR-Glasfasern durchgeführt, die sich durch den Gitterabstand und die Feinheit der Rovings in Zugrichtung unterscheiden.

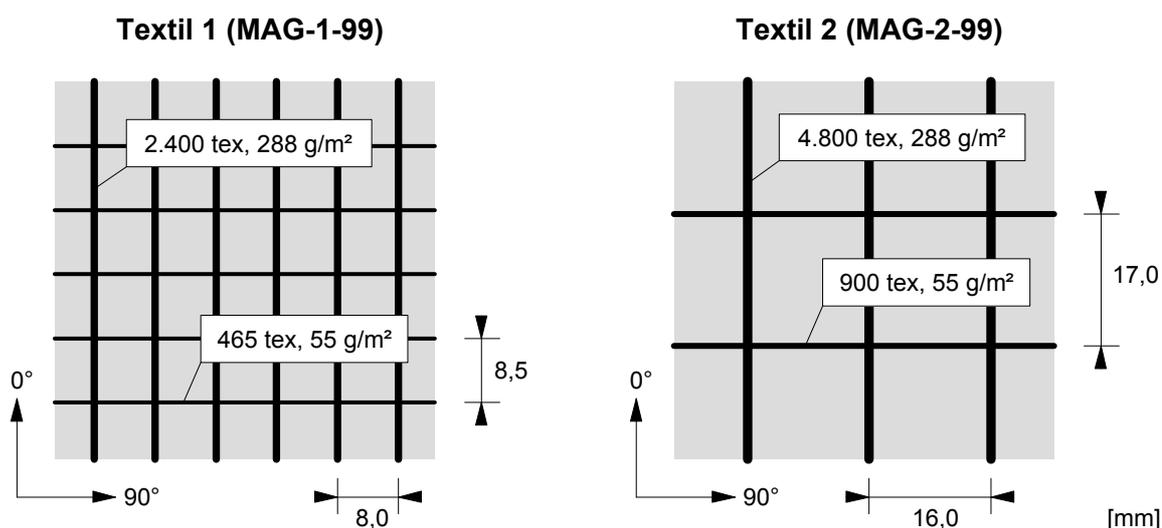


Abbildung 2-17: Geometrie und Feinheit der untersuchten Textilien nach [26]

(1) Einfluss des Bewehrungsgrades

Der Einfluss der Bewehrungsmenge auf die Tragfähigkeit kann mittels Variation des Bewehrungsgrades A_t/A_c (A_t = Querschnittsfläche der Bewehrung, A_c = Betonquerschnittsfläche) durch die ein- bis dreilagige Anordnung der Textile bestimmt werden.

Werden Bewehrungsgrad und Faserwirksamkeit $F_{ctu}/A_c \cdot \sigma_{max}$ (F_{ctu} = Zugtragfähigkeit des Textilbetonquerschnitts, σ_{max} = Zugfestigkeit der Garne) in Relation gesetzt (Abbildung 2-18), wird deutlich, dass bei Bewehrungsgraden zwischen 2,0 % und 3,5 % die Faserwirksamkeit nicht abnimmt. Die geringere Faserwirksamkeit bei einem Bewehrungsgrad von 1,0 % ist damit zu begründen, dass die Bewehrung die Risskraft nicht aufnehmen konnte. [26]

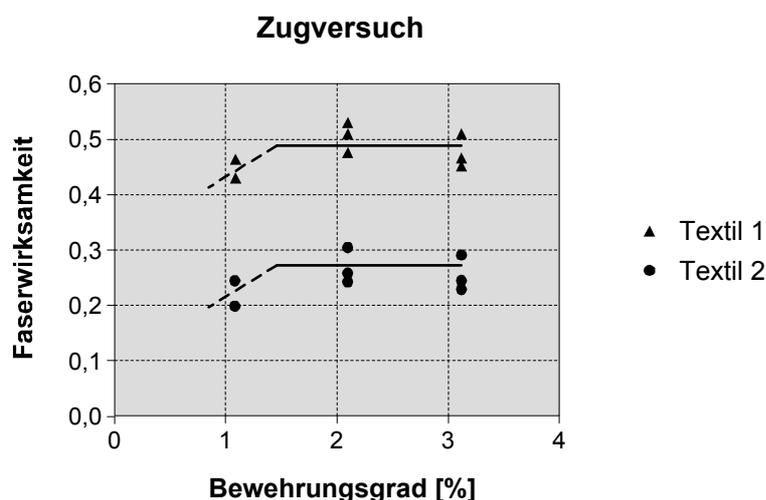


Abbildung 2-18: Einfluss des Bewehrungsgrades auf die Wirksamkeit nach [26]

Der Ausnutzungsgrad der textilen Bewehrung liegt bei dem engmaschigen Textil 1 im Mittel bei 48 %, beim weitmaschigeren Textil 2 bei etwa 25 %. [26]

(2) Einfluss der Querschnittsgeometrie der Rovings

In Kapitel 2.4.5.1 wurde bereits auf den Umstand eingegangen, dass die in direktem Kontakt zur Betonmatrix stehenden äußeren Filamente eines Rovings größere Verbundkräfte übertragen als die im Inneren liegenden Filamente. Faserbündel mit

einem großen Durchmesser weisen dadurch schlechtere Trageigenschaften auf als solche mit einem vergleichsweise kleinen Bewehrungsquerschnitt.

Dieser Sachverhalt konnte an den beiden Textilien, die bei gleichem Bewehrungsgrad unterschiedliche Roving-Durchmesser aufwiesen (Feinheit der Rovings in 0°-Richtung) nachgewiesen werden. Abbildung 2-19 stellt die Faserwirksamkeiten den Quotienten aus Umfang zu Querschnittsfläche U_i/A_i (U_i = Umfang eines Rovings) gegenüber und zeigt deutlich, dass mit zunehmendem Verhältnis von Umfang zu Fläche die Wirksamkeit der textilen Bewehrung steigt. [26]

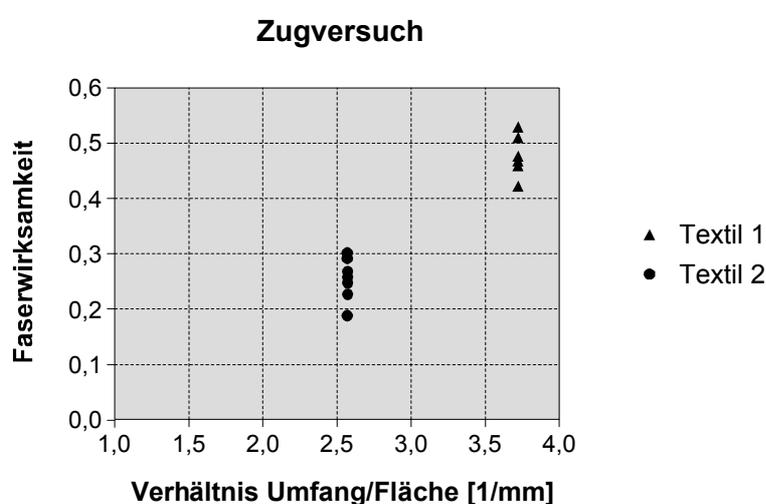


Abbildung 2-19: Einfluss der Querschnittsgeometrien der Rovings nach [26]

(3) Einfluss der Beschichtung der Textilien

Eine höherer Ausnutzungsgrad der textilen Bewehrung kann durch die Aktivierung der inneren Filamente erreicht werden. Die direkte Beschichtung oder Laminierung bzw. die Modifikation des Feinbetons mit Kunststoffzusätzen (vgl. Kapitel 2.4.4.2) führt zu einer Verbesserung der Verbundeigenschaften im Inneren eines Rovings, da die Filamente verklebt werden und durch eine derartige Homogenisierung des Querschnitts mehr Filamente an der Lastabtragung beteiligt sind.

In Biegeversuchen an profilierten Balken (vgl. Kapitel 2.4.6.2) mit beschichteter und unbeschichteter Bewehrung konnte eine deutliche Steigerung der erreichbaren Bruchmomente nachgewiesen werden. Die mit laminierten Textilien bewehrten Proben erreichten die bis zu 2,5fachen Werte der unlaminierten Versuchskörper. [26]

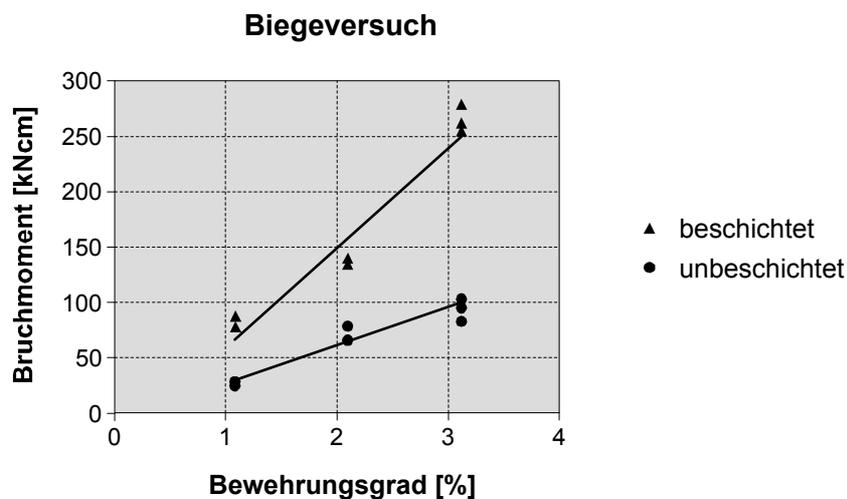


Abbildung 2-20: Einfluss der Beschichtung auf die Biegetragfähigkeit nach [26]

(4) Einfluss der Neigung der Faserstränge

Weisen die Garne bzw. Rovings eine Abweichung von der Hauptbeanspruchungsrichtung auf, führt dies zu einer Reduktion der aufnehmbaren Kräfte.

Um die Einflüsse einer Verdrehung der Faserstränge gegen die Zugrichtung zu quantifizieren, wurden Versuche an Dehnkörpern mit schrittweise von 0° bis 90° gegenüber der Zugrichtung gedrehten Textilien durchgeführt. Der vom Neigungswinkel α abhängige Abfall der in der Bewehrung aufnehmbaren Kraft wird mit einem Beiwert $k_{0,\alpha}$ erfasst, dessen Größenordnung Abbildung 2-21 entnommen werden kann. [26]

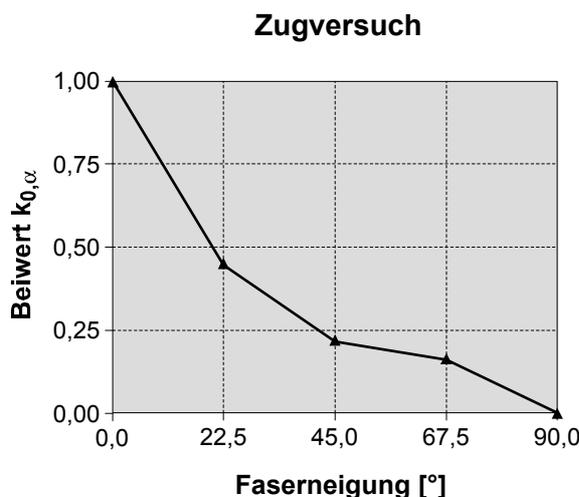


Abbildung 2-21: Einfluss der Faserneigung auf die Zugtragfähigkeit nach [26]

(5) Zugtragfähigkeit des Verbundquerschnitts

Unter Berücksichtigung der in den Absätzen (1) bis (4) charakterisierten Einflüsse auf den Verbundquerschnitt lässt sich die Zugtragfähigkeit eines Textilbetonquerschnitts nach HEGGER ET AL. mit der in Gleichung 2-1 wiedergegebenen Beziehung ermitteln.

$$F_{ctu} = \sum_{i=1}^n k_1^i \cdot k_{0,\alpha}^i \cdot A_t^i \cdot \sigma_{max}^i$$

F_{ctu}	Zugkraft des Verbundquerschnitts [N]
k_1	Faktor für die Effektivität []
$k_{0,\alpha}$	Beiwert für die Faserneigung []
A_t	Querschnittsfläche der Bewehrung [mm ²]
σ_{max}	Zugfestigkeit der Garne [N/mm ²]

Gleichung 2-1: Zugtragfähigkeit eines Textilbetonquerschnitts nach [26]

Zwischen der Querschnittsfläche der Rovings A_t und der Zugtragfähigkeit F_{ctu} lässt sich ein annähernd linearer Zusammenhang herstellen. Der Faktor k_1 wird hauptsächlich durch die Geometrie des Bewehrungsquerschnitts und eine Beschichtung der Textilien beeinflusst. Der Neigungsbeiwert $k_{0,\alpha}$ berücksichtigt eine Verdrehung der Faserstränge gegenüber der Zugrichtung. [26]

Weitere systematische Versuchsreihen sind erforderlich, um die gewonnenen Erkenntnisse auf beliebige Bewehrungstextilien übertragen zu können und ein umfassendes Beschreibungsmodell für das Tragverhalten textilbewehrter Bauteile zu erhalten.

2.4.5.3 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit des textilbewehrten Betons wird bestimmt durch die Wechselwirkungen zwischen Fasermaterial, Bindemittel und Verbundverhalten. Sowohl eine Schädigung der Einzelkomponenten als auch eine Schwächung des Verbundverhaltens führen zu einer Herabsetzung der Dauerhaftigkeit des Textilbetons [8].

Auch wenn es noch widersprüchliche Meinungen über die Ursachen und exakten Abläufe der Schädigungsprozesse gibt, können im Wesentlichen die zwei hauptverantwortlichen Schadensmechanismen genannt werden, die in Abbildung 2-22 schematisch dargestellt sind.

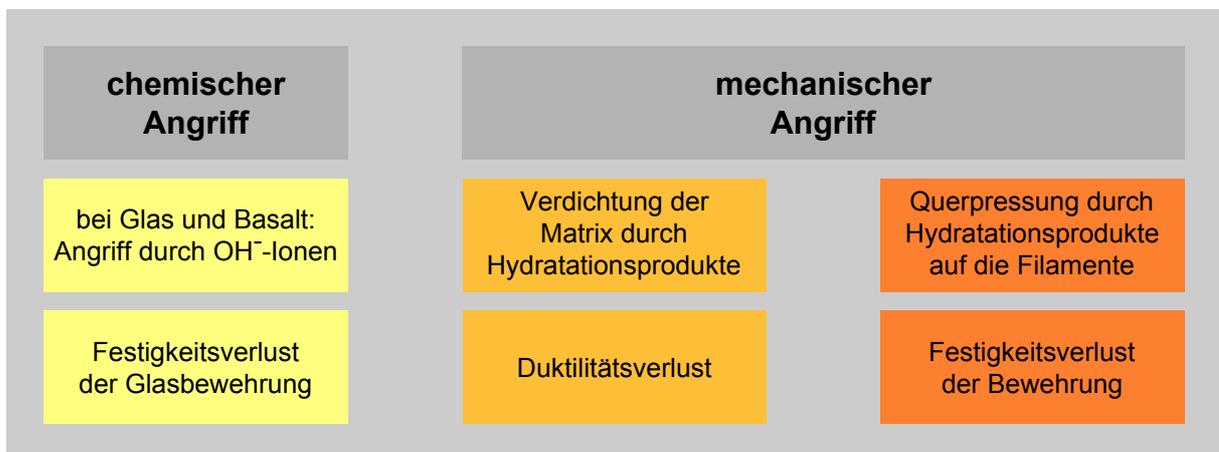


Abbildung 2-22: Schematische Darstellung der Schadensmechanismen nach [27]

(1) Chemischer Angriff

Das Fasermaterial, bestehend aus Garn mit Glasfilamenten und Schlichte, wird durch chemisch korrosive Einflüsse aus der alkalischen Porenlösung der Feinbetone geschädigt. In einem ersten Schritt wird die das Garn umgebende Schlichte abgetragen und der Filamentkörper freigesetzt. Erst danach erfolgt der eigentliche

chemische Angriff auf das Siliziumoxid-Netzwerk der Glasfasern durch Hydroxylionen aus der Porenlösung [8].

Selbst sogenannte AR-Gläser, die durch Beigabe von Zirkonium deutlich alkaliresistenter als andere Gläser sind, unterliegen in Betonen mit hohen pH-Werten, hohem Wassergehalt und bei hohen Temperaturen einem korrosiven Angriff. Versuche am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen haben gezeigt, dass es bei der Lagerung von AR-Glasrovings in nachgestellten Porenlösungen bei einem pH-Wert von 14 zu einem über 50 %igen Verlust an Filamentzugfestigkeit kommt. Bei einem pH-Wert von 11,6 hingegen konnten keine signifikanten Festigkeitsverluste festgestellt werden [27].

Tabelle 2-13: Zugversuche an Filamenten eines AR-Glasrovings nach [27]

Art der Lagerung in künstlicher Porenlösung	Zugkraft [N]	Verlust an Zugkraft gegenüber unbeanspruchten Filamenten [%]
Keine (Referenz)	0,335	-
Lösung pH 11,6 bei 80°C über 7 Tage	0,321	0,5
Lösung PpH 14 bei 80°C über 7 Tage	0,163	51,0

RAUPACH und ORLOWSKY haben in umfangreichen Versuchen den Einfluss der Alkalität und unterschiedlicher klimatischer Verhältnisse auf textile Bewehrung aus AR-Glasrovings untersucht und kommen zu dem Schluss, dass der chemische Angriff auf das Fasermaterial den maßgeblichen Schädigungsmechanismus darstellt. Der beobachtete Korrosionsverlauf zeichnet sich durch einen anfänglich starken Festigkeitsverlust aus, der über längere Zeiträume nur noch in sehr geringem Umfang zunimmt.

Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass der Schädigungsprozess in zwei Phasen abläuft [19]:

- **Phase I**

Während der ersten Phase der Glaskorrosion bildet sich um das Roving eine äußere Schutzschicht aus redepositioniertem Calciumhydroxid und Silanolgruppen sowie eine zirkoniumoxidreiche innere Schutzschicht.

- **Phase II**

In der zweiten Phase wird die Korrosion durch die gebildete Schutzschicht wesentlich behindert.

Als maßgebende Einflussgrößen auf den Grad des Festigkeitsverlustes lassen sich Feuchte, Temperatur und Alkalität identifizieren. Generell ist festzustellen, dass die beschriebene Korrosion der AR-Glasbewehrung erst ab einer kritischen Feuchte auftritt.

(2) Mechanischer Angriff

An der Grenzfläche zwischen Filament und Feinbetonmatrix bilden sich vermehrt Hydratationsprodukte, die durch eine Verdichtung der Kontaktzone die Duktilität in diesem Bereich herabsetzen. Des Weiteren wird vermutet, dass die aufwachsenden Calciumhydroxidkristalle das auf Querkraft empfindliche Glas durch die entstehende Querpressung schädigen.

(3) Kombiniertes Angriff

Zur Beurteilung und Quantifizierung des Einflusses eines kombinierten chemischen und mechanischen Angriffs auf das Langzeitverhalten wurden entsprechende Prüfmethode entwickelt, die in Kapitel 2.4.6.3 näher beschrieben werden.

2.4.6 Prüfmethode

Derzeit gibt es noch keine einheitlichen oder standardisierten Prüfverfahren für Textilbeton. Nachfolgend findet sich eine Zusammenstellung von kürzlich in der Fachliteratur publizierten Verfahren und Methoden, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

2.4.6.1 Untersuchung des Verbundverhaltens

(1) Pull-Out Test

Zur Beurteilung des Verbundverhaltens werden in Prüfkörper einbetonierte Garne einem Auszugsversuch unterworfen und die Kraft-Verschiebungsbeziehung erfasst.

Die experimentell ermittelten Pull-Out Kurven stellen die Grundlage für eine analytische Erfassung der Verbund- und Versagens-Mechanismen dar und sind für

die Vorhersage und Abschätzung der erreichbaren Verbundfestigkeiten sowie der Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehungen sehr wichtig.

Die einfachste Form dieses Versuches ist der einseitige Pull-Out Test, bei dem das Garn gegen ein Widerlager aus der Betonmatrix herausgezogen wird.

Da diese versuchstechnische Anordnung praxisrelevante Bauteilbedingungen wie z.B. rissüberbrückendes Verhalten nicht berücksichtigt, wurden auch Versuchsanordnungen mit rückseitig fest verankerten Garnen entwickelt. Sie liefern praxisgerechtere Ergebnisse, sind in ihrer Ausführung aber wesentlich komplexer als der einseitige Auszugsversuch. [34]

2.4.6.2 Untersuchung der Tragfähigkeit

Die vorgestellten Versuche zum Tragverhalten von mit Glasfasergelegen verstärkten Bauteilen wurden an der RWTH Aachen entwickelt.

(1) Zugversuch

Die Prüfung erfolgt an einem 900 mm langen Dehnkörper, dessen Querschnitt (Abmessungen 100 mm × 10 mm) mit einem in zwei Lagen angeordneten, biaxialen Gelege verstärkt ist.

Geometrie und Versuchsanordnung können Abbildung 2-23 entnommen werden.

Die zentrische Zugtragfähigkeit wird weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min im Messbereich ermittelt. [12]

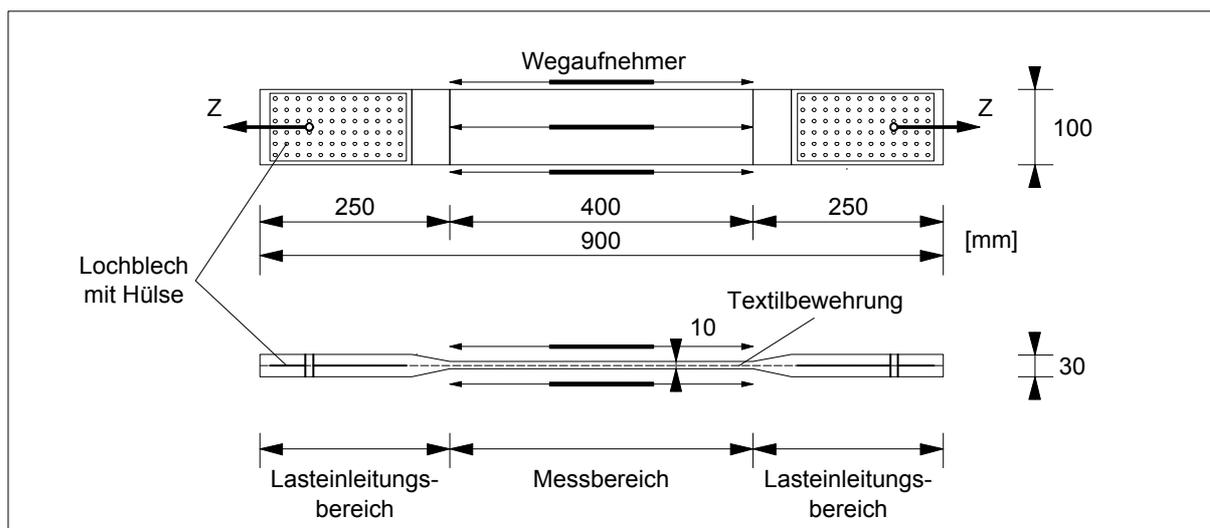


Abbildung 2-23: Geometrie und Versuchsaufbau der Zugversuche nach [12]

(2) Biegeversuch

Ein 900 mm langer Balken mit einem Querschnitt gemäß Abbildung 2-24 und einer zweilagigen Textilbewehrung im Zugflansch und in den Stegen, wird einem Vierpunkt-Biegeversuch unterworfen, der über den Wegaufnehmer zur Messung der Mittendurchbiegung gesteuert wird.

Neben der Prüfkraft werden die Betonstauchungen an den Stegoberkanten mit Dehnungsmessstreifen (DMS), die Mittendurchbiegung sowie die Dehnung an der Bauteilunterseite mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. [12]

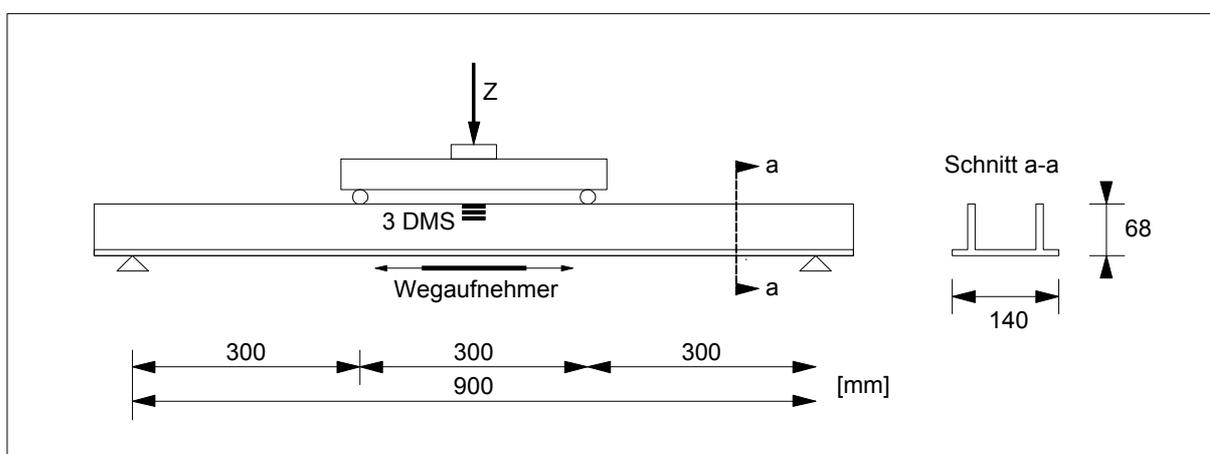


Abbildung 2-24: Versuchsanordnung der Biegeversuche nach [12]

2.4.6.3 Untersuchung der Dauerhaftigkeit

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 532 wurden an der RWTH Aachen verschiedene Prüfverfahren zur Beurteilung der dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter entwickelt, die langfristig eine Modellierung des Alterungsverhaltens textiltbewehrter Betone ermöglichen sollen.

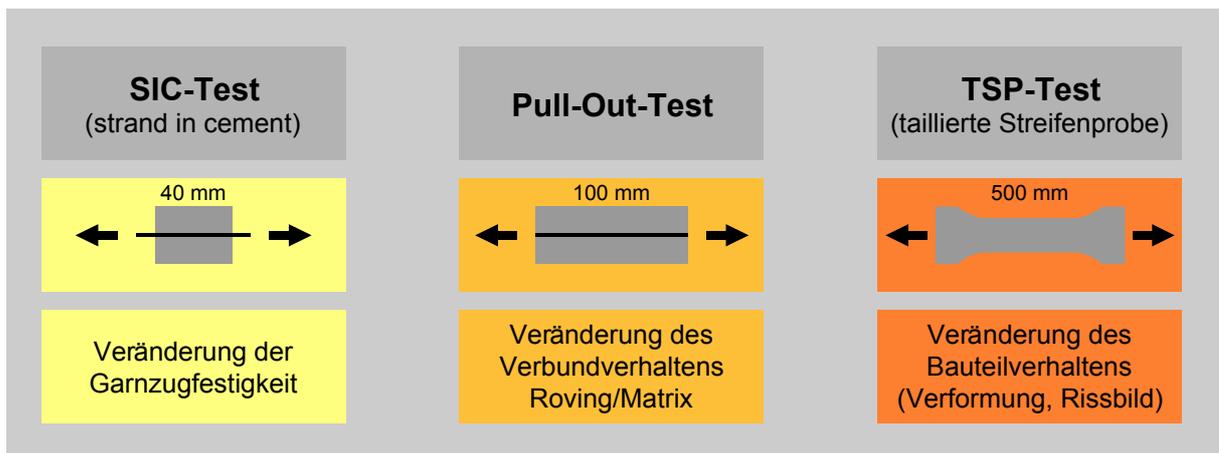


Abbildung 2-25: Versuche zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit nach [27]

(1) Filamentzugversuch

Zur Bestimmung des Langzeiteinflusses auf die Filamentzugfestigkeit werden Filamente in verschiedenen Porenlösungen mit pH-Werten zwischen 7 und 13,5 und bei unterschiedlichen Temperaturen von 20 °C bis 80 °C gelagert und anschließend einem Zugversuch unterzogen. [19]

(2) SIC-Test

Mit dem sogenannten SIC-Test (strand in cement) kann die aufnehmbare Zugkraft eines im Feinbeton eingebetteten Rovings nach einer definierten klimatischen Lagerung ermittelt werden. Ein Vergleich der SIC-Ergebnisse mit den Zugversuchen an in temperierten pH-Lösungen eingelegten Filamenten gibt Aufschluss über den Grad und Einfluss der Schädigungsmechanismen [27].

Ein Roving wird mittig in einem Betonkörper mit den Abmessungen 10 × 10 × 40 mm einbetoniert. Nach einer temperierten Wasserlagerung über 28 Tage und einer anschließenden Trocknung des Betonkörpers bei etwa 65 % r.F. wird eine Zugkraft auf die aus dem Beton herausgeführten Rovingenden aufgebracht. Der Versuch wird

weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1,0 mm/min durchgeführt. Falls der Roving infolge der klimatischen Beanspruchung an Festigkeit verloren hat, reißt er innerhalb des Betonkörpers [27].

Der SIC-Test eignet sich als ein Schnelltest für die Klassifizierung verschiedener Materialkombinationen, er ermöglicht jedoch keine allgemein gültigen Aussagen zur Bauteilbeständigkeit gegenüber klimatischen Einflüssen.

(3) TSP-Test

Um eine praxisrelevante Beurteilung der Dauerhaftigkeit textilbewehrter Bauteile zu ermöglichen wurde dem am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen der sogenannte TSP-Test (Taillierte Streifenprobe) entwickelt. Er ermöglicht Aussagen über die Veränderung des Kraft-Dehnungsverlaufs, des Rissbildes sowie der Garnzugfestigkeit einaxial belasteter Bauteile nach einer beliebigen klimatischen Beanspruchung [27].

Mehrere Rovings bzw. Textilien werden mittig zur Probendicke in eine taillierte Streifenprobe einbetoniert. Die Bewehrung ist gleichmäßig über die Probenbreite verteilt, die aufgeweiteten Flügel sind unbewehrt. Zur Krafteinleitung werden durchbohrte Stahlplatten auf die Streifenprobe geklebt. Die Belastung bis zum Bruch erfolgt weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min. Die Längenänderung wird zum einen mittels an den Stahlplatten befestigten induktiven Wegaufnehmern über die gesamte Prüflänge gemessen. Die Dehnungen bis zum Beginn der Rissentwicklung werden zum anderen mit einem weiteren Wegaufnehmer mittig der Probe über eine Messlänge von 100 mm bestimmt [27].

2.4.7 Anwendungen und Zukunftsperspektiven

Gegenwärtig wird textil verstärkter Beton lediglich in kleinerem Maßstab für untergeordnete Bauteile verwendet [22]. Das Anwendungsspektrum erstreckt sich von so genannten Hilfsprodukten, wie z.B. Aussparungskästen, Randabschalungen, Installationskanälen, bis hin zu eigenständigen Bauelementen in Form von Fassadenelementen [20].

Ein wirtschaftlicher Einsatz textildbewehrter Bauteile mit tragender Funktion ist derzeit noch nicht möglich. Einerseits ist es aufgrund der fehlenden Technologie und der hohen Preise der textilen Komponenten noch nicht möglich die herkömmliche Stahlbewehrung im industriellen Maßstab durch Textilien zu ersetzen [23]. Andererseits bedarf es für den Einsatz als tragendes Bauteil einer speziellen bauaufsichtlichen Zulassung, da allgemeine Normungen für Textilbeton fehlen [24].

Bei den im Folgenden vorgestellten Anwendungsbeispielen handelt es sich um experimentelle Konzeptstudien, welche die Eignung textildbewehrter Betonbauteile als Basiselemente für die Fertigung räumlicher Tragsysteme untersuchen und belegen sollen.

2.4.7.1 Anwendungsbeispiele

(1) Bogendach mit Rautenfachwerk-Tragsystem

Am Lehrstuhl für Baukonstruktionen 2 der RWTH Aachen wurde in einem Teilbereich des SFB 532 ein tonnenförmiges Bogendach entworfen, das aus diagonal kreuzenden Bogenscharen gebildet wird. Das Tragsystem wird aufgrund seiner Bogengeometrie weitgehend auf Druck beansprucht und gewährleistet somit eine hohe Ausnutzung der Tragfähigkeit des Werkstoffs Beton. Die Diagonalstellung der Bögen sorgt für die Aussteifung der Konstruktion in Längsrichtung. Das in Abbildung 2-26 dargestellte, räumlich gekrümmte Rautenfachwerk entsteht durch die trockene Fügung vorgefertigter Grundelemente zu einem die Bogenform annähernden Polygonzug. [22]

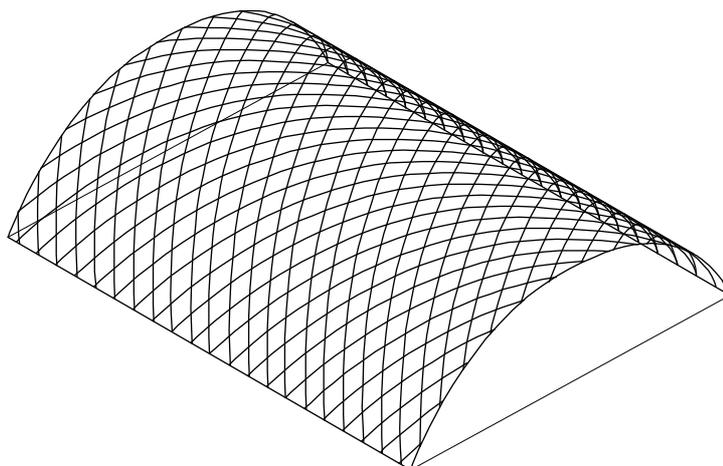


Abbildung 2-26: Isometrische Darstellung Rautenfachwerktonne nach [22]

Historische Beispiele der 1950er bis 1960er Jahre belegen die Durchführbarkeit dieses Konstruktionsprinzips mit den Mitteln des Stahlbeton-Fertigteilbaus [22]. Um nun die Leistungsfähigkeit textildbewehrter Betonbauteile als tragende Elemente für derartig komplexe Schalenformen zu verifizieren wurde ein Rautenelement entwickelt, das sich gegenüber gleichartigen Bauteilen mit Stahlbewehrung durch ein geringeres Eigengewicht und schlankere Bauteilabmessungen auszeichnet.

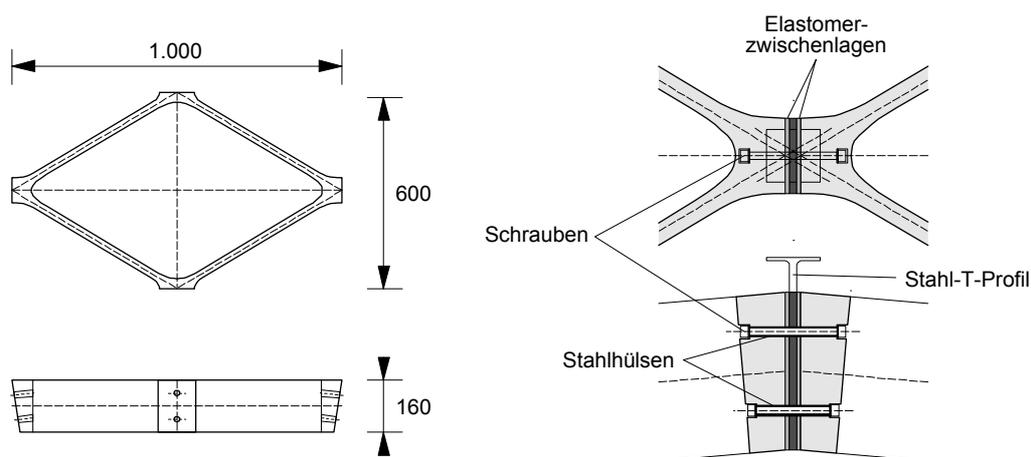


Abbildung 2-27: Systemskizze Rautenelement, Detail Knotenausbildung nach [22]

Das in Abbildung 2-27 dargestellte Textilbetonbauteile mit den Außenabmessungen 1.000×600 mm und einer Bauteilhöhe von 160 mm weist bei einer Wandstärke von 25 mm ein Eigengewicht von ca. 23 kg auf. An den mit 5° abgeschrägten Schmalseiten befinden sich einbetonierte Kragenhülsen aus Stahl, die eine Verbindung der einzelnen Elemente mit in den Querschnitt versenkten Schrauben ermöglicht. Elastomerzwischenlagen in den Knotenpunkten verhindern hohe Kantenpressungen, zur Befestigung der Außenhülle sind zusätzlich Stahl-T-Profile integriert. [22]

Die Verstärkung des Bauteils erfolgt durch einen textilen Bewehrungskorb, der aus einem Abstandsgewirk mit Deckflächenabstand 20 mm und jeweils einer umlaufenden Schicht Kohlenstofffasergelege besteht. Das Zweiwandgewebe dient zur Lagepositionierung des Bewehrungskorbes in der Schalung und gewährleistet durch seine Steifigkeit die Formstabilität der Verstärkungsstruktur. Die notwendige Tragfähigkeit der textilen Bewehrung wird durch das mit Epoxidharz aufgeklebte Kohlefasergelege erreicht.

Die exakte Positionierung des steifen Bewehrungskorbes über das Abstandsgewirk ermöglicht die Ausführung mit einer Betondeckung von weniger als 5 mm. [14]

Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass Textilbetonbauteile für den Einsatz in tragenden Konstruktionen geeignet sind. Komplex formbare Textilien bilden die Grundlage für die Entwicklung von Strukturen, bei denen konstruktive und gestalterische Eigenschaften des neuen Werkstoffes wie Schlankheit der Bauteile, geringes Gewicht, scharfkantiges Erscheinungsbild und hervorragende Betonoberflächen zum Tragen kommen. [22]

(2) Systemhaus aus Textilbeton-Sandwichelementen

Die gegenwärtig sehr hohen bauphysikalischen Anforderungen an Gebäudehüllen führen zu immer stärkeren und komplexeren Wandaufbauten. Insbesondere bei der Ausführung von Außenwänden mit beidseitigen Oberflächen in Sichtbetonqualität entstehen durch die Notwendigkeit einer zweischaligen Konstruktion mit innen liegender Wärmedämmung häufig Bauteilstärken von 40 bis 45 cm. Durch die Verstärkung der tragenden Schalen mit textilen Werkstoffen sind deutlich

dünnwandigere Aufbauten möglich, da beidseitig auf die statisch unwirksamen Betondeckungen verzichtet werden kann. [22]

Unter diesem Prämissen wurde am Lehrstuhl für Baukonstruktionen 2 der RWTH Aachen ein Sandwichelement aus Textilbeton entwickelt, das bei vergleichbaren bauphysikalischen Kennwerten gegenüber konventionellen zweischaligen Außenwandkonstruktionen in Sichtbetonqualität eine Gesamtwanddicke von lediglich 16 cm aufweist. Die praktische Einbindung in den Gebäudekontext wurde anhand eines kleinen Systemhauses verifiziert. [22]

Das Gebäudekonzept (vgl. Abbildung 2-28) basiert auf einem modularen System von Wand- und Deckenelementen, dem ein Modulraster von 90 cm zugrunde liegt. Das zweigeschossige Gebäude wird aus 90 cm breiten und 2,70 m hohen Wandelementen sowie 90 cm breiten Deckenelementen mit einer Spannweite von 3,60 m gebildet. Fenster- und Türöffnungen sind aufgrund des gewählten Modulrasters durch Weglassen einzelner Elemente realisierbar. [22]

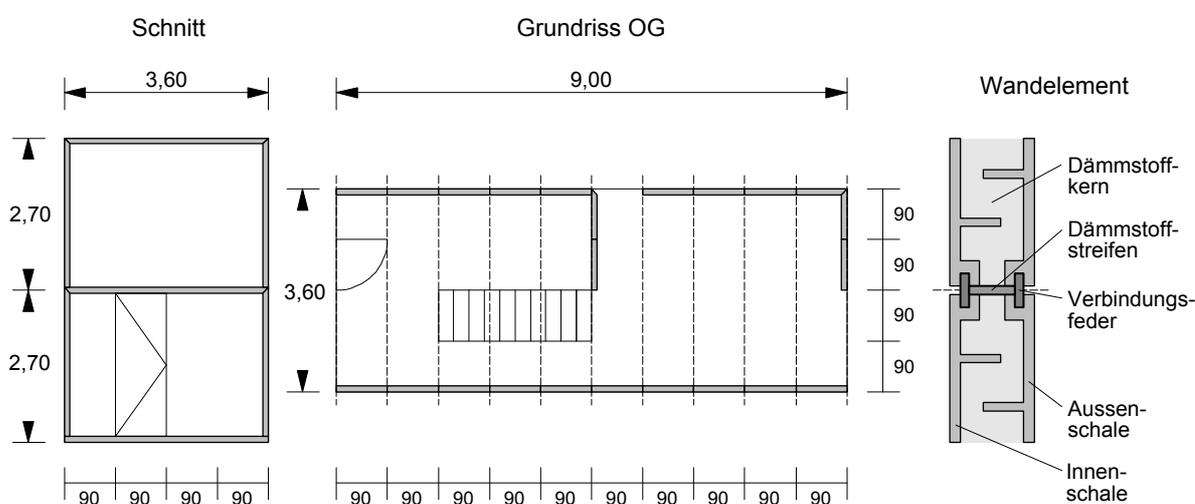


Abbildung 2-28: Gebäudekonzeption und Elementausbildung nach [22]

Die 16 cm dicken Wandelemente bestehen aus jeweils 25 mm starken, textilbewehrten Stegplatten an den Außenseiten und einem mit Dämmstoff gefülltem Innenraum. Die Stege sind versetzt an den Elementinnenseiten angeordnet, sodass außen glatte, hochwertige Sichtbetonoberflächen entstehen. Bei den

Deckenelementen verbinden die innen liegenden Stege die beiden Schalen zu einem kastenförmigen Querschnitt. [22]

Anhand dieser exemplarischen Bauwerksstudie lässt sich das Potential textil verstärkter Bauteile auf dem Gebiet der Leichtbaukonstruktionen erkennen. Geringe Wandstärken, einfacher Schichtaufbau, geringe Elementgewichte und hochwertige Sichtbetonoberflächen machen den Textilbeton zu einem konkurrenzfähigen Werkstoff im Fertigteilbau. Nichttragende Sandwichelemente, wie sie schon in den 1970er und 1980er Jahren in Form von Faserzement-Sandwichelementen als Fassadenbauteile praktische Anwendung gefunden haben, bieten sich für den Einsatz in Geschossbauten an. Bei kleineren Gebäuden, wie z.B. Wohnhäusern ist in Zukunft sogar der Einsatz als tragendes Bauteil denkbar. [22]

2.4.7.2 Wirtschaftlichkeit und Produktionstechnologie

Wie die vorangegangenen Beispiele verdeutlichen, liegt das Hauptanwendungsgebiet des Textilbetons in den kommenden Jahren größtenteils im Fertigteilbau. Der Bedarf an räumlich geformten, filigranen Bauteilen aus textildbewehrtem Beton als eigenständige Produkte oder als Ergänzung zu herkömmlichen Betonelementen ist vorhanden. Der Erfolg dieser neuartigen Produkte hängt vor allem von einer bedarfsgerechten Entwicklung und einer wirtschaftlichen Produktion, d.h. industrielle Fertigung in großen Stückzahlen, ab. [20]

In erster Linie müssen Material und Produktion hinsichtlich der Kosten optimiert werden.

Da die Betonkomponenten ausreichend günstig zu beziehen sind, können die Materialkosten nur über die Bewehrung beeinflusst werden. Eine Minimierung der Menge und Maximierung der Wirkung der teuren Glasfasern ist mit einem dem Kräfteverlauf entsprechenden Einbau von Langfasern möglich. Handelt es sich um streifen- bzw. balkenförmige Produkte, so ist der direkt ab Rolle verarbeitbare Roving die wirtschaftlichste Variante. Flächige Bauteile bedürfen einer Verstärkung in Längs- wie Querrichtung, die nur mit konfektionierten Flächengebilden erzielbar ist. Die Herstellung der Gewebe bzw. Gelege verursacht zusätzliche Kosten, die aber durch

die gezielte Anpassung der nahezu beliebig formbaren Bewehrung an die Beanspruchung egalisiert werden können.

Produktionskostenminimierung ist hauptsächlich über einen möglichst hohen Automatisierungsgrad erreichbar. Grundvoraussetzungen hierfür sind die schnelle und präzise Herstellung der Bauteilgeometrie während des Fertigungsprozesses sowie die direkte Entschalbarkeit des Produktes nach dem Formprozess. Da bei engmaschigen Textilien anfänglich mit einem sehr flüssigen Beton gearbeitet werden muss, ist es notwendig, der Matrix nach dem Formprozess Wasser zu entziehen, um einen formstabilen Zustand zu erreichen. Dies kann über eine Druckbeaufschlagung erfolgen, die das geformte Bauteil verdichtet und entwässert und so einen sofort entschaltbaren, erdfeuchten Beton mit ausreichender Grünstandsfestigkeit erzeugt. [20]

Zusammenfassend lässt sich eine wirtschaftliche Produktionstechnologie für textilbewehrte Bauteile durch folgende Prozessparameter charakterisieren: [20]

- Direkte Entschalbarkeit der erdfeuchten Betonmatrix;
- Formbarkeit der räumlichen Geometrie während der Fertigung;
- Optimierung der Bewehrung durch Auswahl von Roving oder textilem Flächengebilde;
- Lagenweiser Einbau von Matrix und Bewehrung.

2.4.7.3 Zukunftsperspektiven

(1) Reduktion der Bauteilstärken

Bei textilen Bewehrungsstrukturen kann auf die bei Stahleinlagen notwendigen großen Betondeckungen verzichtet werden. Ihre Anpassungsfähigkeit an beliebige Formen ermöglicht zudem die Herstellung nahezu beliebiger Querschnittsformen.

(2) Oberflächennahe Bewehrung zur Rissbreitenbeschränkung

Korrosionsunempfindliche Textilien können im Unterschied zu Stahleinlagen ohne Mindestbetondeckung sogar in karbonatisierten Randzonen von Stahlbetonbauteilen

eingebaut werden und so effektiver eine Rissbreitenbeschränkung gewährleisten [24].

(3) Ertüchtigung von Tragwerken

Durch die Applikation von textilbewehrtem Beton an bestehenden Massivbauwerken kann deren Tragfähigkeit entscheidend erhöht werden. Experimente haben gezeigt, dass nachträglich verstärkte Stahlbetonplatten die nahezu doppelte Traglast erreichen. Der Bereich der Erhaltung und Erneuerung von Bauwerken ist somit für den Textilbeton ein viel versprechendes Einsatzgebiet [24].

(4) Erdbebensicheres Bauen

Die oberflächennahe Verstärkung hoch belasteter Konstruktionsbauteile mit textilen Flächengebilden kann zur Erhöhung der Duktilität und somit zur Sicherung des Bauwerks gegen dynamische Belastungen beitragen [24].

(5) Herstellung von dünnwandigen Fertigteilen

Die kontrollierte Produktion dünnwandiger Bauteile im Fertigteilwerk bringt Vorteile sowohl hinsichtlich der Transportkosten aufgrund der Gewichtsreduktion als auch der Qualitätssicherung. Mögliche Anwendungen textilbewehrter Fertigteile sind z.B. Fassadenelemente oder Verkleidungen, Kabelkanäle, Rohre und Lärmschutzwände [24].

3 Vorversuche

3.1 Versuchsplanung

3.1.1 Vorbemerkungen

Ziel der Versuche war die Entwicklung eines Hochleistungsbetons, der hinsichtlich seiner rheologischen Eigenschaften für den Einsatz in textilen Schalungselementen unter verschiedenen Neigungswinkeln geeignet ist.

Die Versuchsdurchführung wurde in mehrere Teilbereiche unterteilt, über die Abbildung 3-1 einen Überblick gibt.

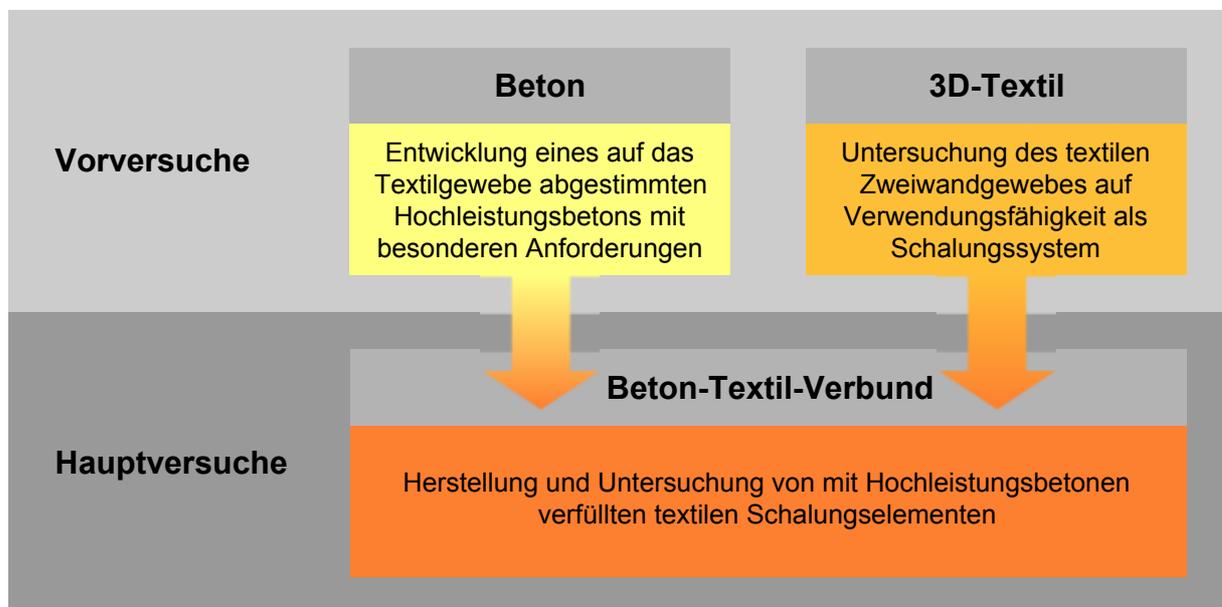


Abbildung 3-1: Organigramm Versuchsablauf

Die einführenden Vorversuche gliederten sich in die Teilbereiche „Beton“ und „3D-Textil“ wobei in der vorliegenden Arbeit nur der betontechnologische Teil der Vorversuche behandelt wird.

Vom Teilbereich „3D-Textil“ wurde ein Zweiwandgewebe aus Polyester vorgegeben, dessen Eigenschaften und Geometrie die Basis für den Entwurf der Betonrezepturen bildete und in Kapitel 4.2.1 vorgestellt wird.

Aufgabe der Vorversuche war es, auf die Abstandsfadengeometrie dieses textilen Zweiwandgewebes optimal abgestimmte Rezepturen für Hochleistungsbetone zu entwickeln.

3.1.2 Vorgaben, Anforderungen

Um die Verträglichkeit der Bestandteile Beton und Textil zu gewährleisten wurden folgende Anforderungen an die zu entwickelnden Mischungen definiert:

- möglichst fließfähige Konsistenz des Frischbetons ohne zu entmischen
- weitgehend selbstverdichtende und selbstnivellierende Betonmatrix, die kein Rütteln oder Stochern erfordert
- Langzeitstabilität
- geringe Alkalität für eine dauerhafte Beständigkeit der Textilien

In einer ersten Versuchsreihe wurden auf Basis von aus der Literatur bekannten Rezepturen neunzehn Mischungen für ultrahochfesten Beton entworfen und geprüft, die durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet sind:

- Begrenzung des Durchmessers des Größtkorns auf 1 mm
- optimiertes Korngemisch (Abstimmung des Feinkorngehalts, Dosierung der Zusatzstoffe Quarzmehl und Mikrosilika)
- auf niedrige w/b-Werte abgestimmter Gehalt an Hochleistungsverflüssiger zum Erreichen größtmöglicher Fließfähigkeit
- Zusatz von Stahlfasern zur Erhöhung der Biegezugfestigkeiten und Duktilität
- Druckfestigkeiten $> 115 \text{ N/mm}^2$ (28-Tage-Festigkeit)

Anschließend wurde versucht eine Rezeptur zu entwickeln, bei der das größtmögliche Zuschlagskorn verwendet wird, das noch in das Zweiwandgewebe eingefüllt werden kann. Dazu wurden auf Grundlage von Rezepturen für hochfeste Betone neun Mischungszusammensetzungen entwickelt, die folgende Merkmale aufweisen sollten:

- Steigerung des Durchmessers des Größtkorns auf 4 mm
- Druckfestigkeiten $> 60 \text{ N/mm}^2$

Der Aufbau und Entwurf der Mischungen wird ausführlich in Kapitel 3.2 beschrieben.

Zur Beurteilung der Fließfähigkeit wurden als Frischbetonkennwerte die Frischbetonrohichte, der Luftporengehalt sowie das Fließmaß ermittelt. Als Festigkeitskennwerte wurden die Biegezug- und Druckfestigkeit nach 28 Tagen bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung der diesbezüglichen Versuchsdurchführung findet sich in Kapitel 3.3.

Die Auswertung der in den Vorversuchen ermittelten Kennwerte erfolgt in Kapitel 3.4.

3.2 Mischungsaufbau und Mischungsentwurf

3.2.1 Ausgangsstoffe

Abbildung 3-2 zeigt die verschiedenen Komponenten, die zur Herstellung der Probemischungen verwendet wurden.



Abbildung 3-2: Ausgangsstoffe

3.2.1.1 Zuschlag

Als Zuschlag für den ultrahochfesten Beton wurde quarzitischer Feinsand der Firma Kies-Union mit einer Rohdichte von 2.650 kg/m^3 und einem Größtkorn-Durchmesser von 1 mm verwendet.

Für die hochfesten Mischungen kam quarzitischer Grobsand zur Anwendung, dessen Größtkorn einen Durchmesser von 4 mm aufwies.

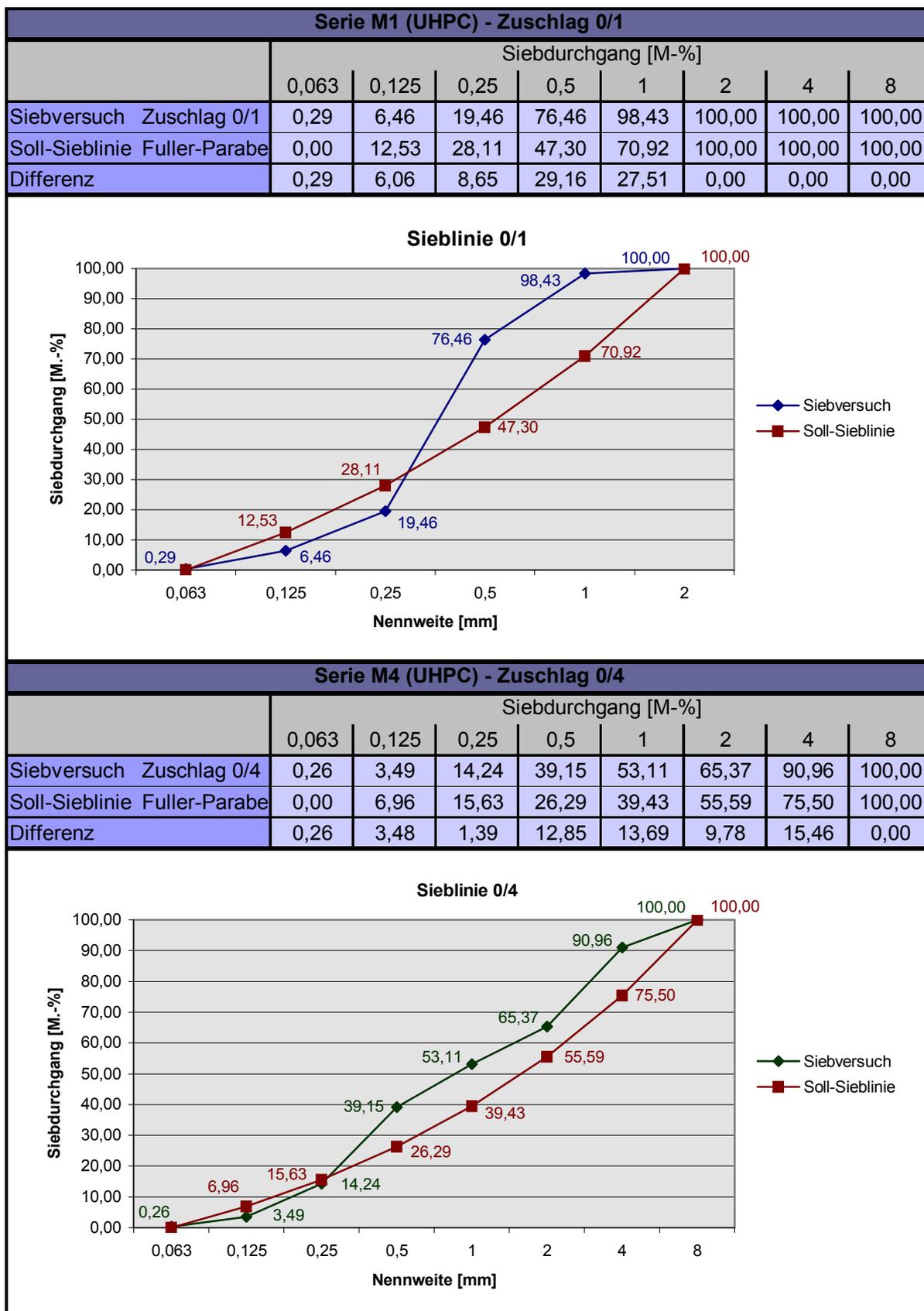
Eine Trockensiebung gemäß ÖNORM B 3304 der beiden Korngemische ergab die in Tabelle 3-1 angeführte Zusammensetzung der Zuschlagsstoffe.

Tabelle 3-1: Kornzusammensetzung Zuschlag

Serie M1 (UHPC) - Zuschlag 0/1							
	1. Probe			2. Probe			Mittelwert
Einwaage [g]	2.001,7			2.003,4			
Auswaage [g]	1.994,3			1.999,2			
Siebverlust [g]	7,4			4,2			
Siebverlust [%]	0,37			0,21			
Zul. Siebverlust [%]	0,50			0,50			
Nennweite [mm]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
2	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	100,00
1	30,1	1,50	98,50	32,9	1,64	98,36	98,43
0,5	489,6	24,46	75,54	453,2	22,62	77,38	76,46
0,25	1.624,7	81,17	18,83	1.601,0	79,91	20,09	19,46
0,125	1.867,8	93,31	6,69	1.878,4	93,76	6,24	6,46
0,063	1.994,3	99,63	0,37	1.999,2	99,79	0,21	0,29
Serie M4 (HPC) - Zuschlag 0/4							
	1. Probe			2. Probe			Mittelwert
Einwaage [g]	4.006,9			4.008,4			
Auswaage [g]	3.996,0			3.998,7			
Siebverlust [g]	10,9			9,7			
Siebverlust [%]	0,27			0,24			
Zul. Siebverlust [%]	0,50			0,50			
Nennweite [mm]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
8	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	100,00
4	392,8	9,80	90,20	331,9	8,28	91,72	90,96
2	1.424,9	35,56	64,44	1.350,9	33,70	66,30	65,37
1	1.916,1	47,82	52,18	1.842,0	45,95	54,05	53,11
0,5	2.464,5	61,51	38,49	2.413,2	60,20	39,80	39,15
0,25	3.419,4	85,34	14,66	3.454,8	86,19	13,81	14,24
0,125	3.868,5	96,55	3,45	3.867,2	96,48	3,52	3,49
0,063	3.996,0	99,73	0,27	3.998,7	99,76	0,24	0,26

In Tabelle 4-2 sind die ermittelten Sieblinien den mit der modifizierten Fullerparabel berechneten Idealsieblinien für hochfeste Betone gegenübergestellt.

Tabelle 3-2: Sieblinien Zuschlag



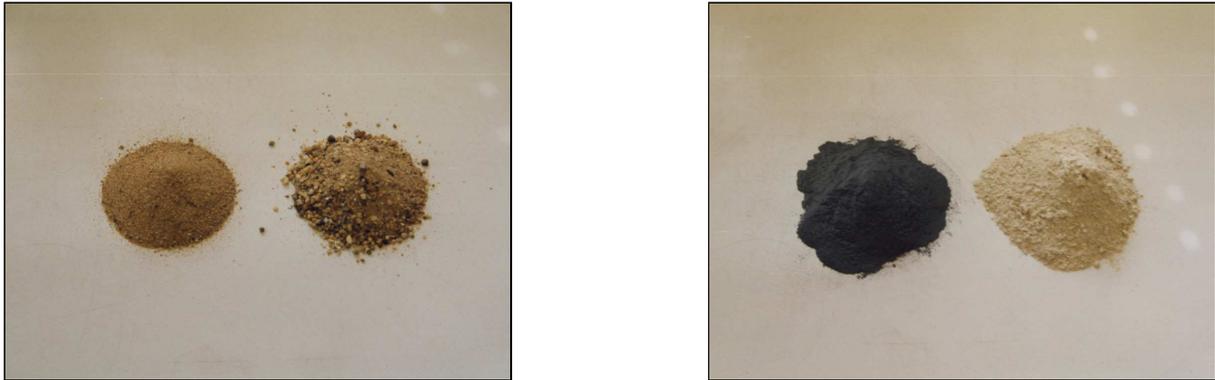


Abbildung 3-3: Zuschlag (links), Quarzmehl und Mikrosilika (rechts)

3.2.1.2 Mehlkorn

Um den Feinkornanteil der Probemischungen zu erhöhen wurde dem Zuschlagsgemisch Quarzmehl mit einer maximalen Korngröße von 125 μm beigefügt. Die Rohdichte wurde von der Herstellerfirma Kies-Union mit 2.650 kg/m^3 angegeben. (Abbildung 3-3)

3.2.1.3 Mikrosilika

Als puzzolanischer Zusatzstoff wurde Addiment Silicoll P der Firma Heidelberg Cement AG beigegeben. Das graue Pulver aus amorphem Siliziumdioxid (SiO_2) weist eine spezifische Oberfläche von 18 bis 20 m^2/g und einen Kornanteil $< 0,045 \text{ mm}$ von mindestens 99 M.-% auf [29]. (Abbildung 3-3)

3.2.1.4 Zement

Wegen seiner guten Verarbeitbarkeit, des geringen Wasseranspruchs und mäßiger Wasserabsonderung wurde Zement der Sorte CEM I 42,5 R WT 38 HS gemäß ÖNORM EN 197-1, ÖNORM B 3327-1 und ÖNORM B 3327-2 der Firma Wietersdorfer & Peggauer Zementwerke GmbH verwendet. Es handelt sich um einen rasch erhärtenden, C_3A -freien, hochsulfatbeständigen Portlandzement mit hoher Frühfestigkeit, guter Nacherhärtung und geringer Wärmeentwicklung.

3.2.1.5 Fließmittel

Zur Reduktion des Wasseranspruchs wurde der Mischung der Hochleistungsverflüssiger Glenium 51 der Firma MBT zugefügt. Die auf modifizierten Polycarboxylaten basierende braune Flüssigkeit besitzt bei 20° C eine Dichte von ca. 1,1 kg/dm^3 und einen pH-Wert von etwa 7 [30]. (Abbildung 3-4)



Abbildung 3-4: Wasser und Fließmittel (links), Stahlfasern (rechts)

3.2.1.6 Wasser

Es wurde reines Trinkwasser verwendet. (Abbildung 3-4)

3.2.1.7 Stahlfasern

Für die Herstellung der ultrahochfesten Betonmischungen wurden Stahlfasern der Firma Bekaert verwendet. Die vermessingten, glatten Fasern weisen eine Länge von 6 mm und einen durchschnittlichen Durchmesser von 180 μm (Verhältnis $l/d = 33$) auf. Die Zugfestigkeit beträgt mindestens 2.000 N/mm^2 [31]. (Abbildung 3-4)

3.2.2 Mischungsentwurf

3.2.2.1 Vorbemerkungen

Um ein vollständiges Ausfüllen der Gewebeschalung zu gewährleisten, mussten die Rezepturen hinsichtlich ihrer Fließfähigkeit optimiert werden.

Dazu wurde die erforderliche Menge an Fließmittel verifiziert, die zum Erreichen des geforderten Fließmaßes notwendig war. Die im Allgemeinen niedrigen w/b -Werte ultrahochfester Betone machen eine sehr hohe Dosierung des Hochleistungsverflüssigers notwendig, deren Auswirkung auf die Betoneigenschaften umfangreich untersucht wurde. In diesem Zusammenhang wurde auch darauf geachtet den Verflüssigergehalt so einzustellen, dass eine nicht allzu flüssige Konsistenz vorliegt, da die Decklagen der Gewebeschalung nicht vom frisch eingefüllten Beton penetriert werden sollten.

3.2.2.2 Betonrezeptur für ultrahochfesten Beton (UHPC)

Ausgehend von einer Grundrezeptur für UHPC wurde der Gehalt an Fließmittel kontinuierlich von 4,0 M.-% bis 6,0 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, erhöht und die Auswirkungen auf Konsistenz und Fließmaß beurteilt. Es zeigte sich, dass ein Fließmittelgehalt von mehr als 6,0 M.-% zur Loslösung von Mikrosilika-Partikeln aus der Matrix führte, die sich an der Frischbetonoberfläche absetzten. Auch eine Erhöhung der Feinstoffanteile durch vermehrte Zugabe von Quarzmehl konnte dieser Entmischungserscheinung nicht entgegenwirken.

Nach der Optimierung des Bindemittelsystem und der Bestimmung des erforderlichen Fließmittelgehalts, wurde schließlich auf Basis dieser Untersuchungen der günstigste Stahlfasergehalt ermittelt. Dazu wurden drei verschiedene Fasergehalte untersucht. Die Beimengung von bis zu 200 kg/m³ wirkte sich nachweislich positiv auf die Fließfähigkeit aus.

Die insgesamt neunzehn verschiedenen Mischungszusammensetzungen der ersten Vorversuchsserie sind in Tabelle 3-3 zusammengestellt, die detaillierten Mischungsentwürfe und Stoffraumrechnungen sind im Anhang A dieser Arbeit beigefügt.

Tabelle 3-3: Mischungszusammensetzungen Serie M1 (UHPC)

	M1-01	M1-02	M1-03	M1-04	M1-05	M1-06	M1-07	M1-08	M1-09	M1-10
Zuschlag 0/1 [kg/m ³]	1.117,1	1.108,7	1.134,0	1.048,9		1.040,5		1.032,0		
Zement [kg/m ³]	700,0									
Wasser [kg/m ³]	224,0									
Fließmittel [kg/m ³]	28,0	31,5	21,0	35,0		38,5		42,0		
Stahlfasern [kg/m ³]	0,0									
Mikrosilika [kg/m ³]	140,0									
Quarzmehl [kg/m ³]	84,0									
Summe [kg/m ³]	2.293,1	2.288,2	2.303,0	2.231,9	2.231,9	2.227,0	2.227,0	2.227,0	2.222,0	2.222,0
W/Z-Wert	0,320									
W/B-Wert	0,300	0,304	0,292	0,308	0,308	0,313		0,317		
Luftporen [%]	-	2,95	-	3,15	4,15	-	-	-	3,55	-
Mischvorgang	A				D	A	B	C		D

	M1-11	M1-12	M1-13	M1-14	M1-15	M1-16	M1-17	M1-18	M1-19	
Zuschlag 0/1 [kg/m ³]	964,9		948,0		931,1		914,3	897,4	880,5	
Zement [kg/m ³]	700,0									
Wasser [kg/m ³]	224,0									
Fließmittel [kg/m ³]	35,0	42,0	35,0	42,0	35,0	42,0	35,0	42,0		
Stahlfasern [kg/m ³]	0,0		50,0		100,0		200,0			
Mikrosilika [kg/m ³]	140,0									
Quarzmehl [kg/m ³]	168,0									
Summe [kg/m ³]	2.231,9	2.231,9	2.222,0	2.265,0	2.255,1	2.298,1	2.288,3	2.364,4	2.354,5	
W/Z-Wert	0,320									
W/B-Wert	0,308		0,317	0,308	0,317	0,308	0,317	0,308	0,317	
Luftporen [%]	-	-	3,65	-	-	3,35	-	3,15	3,05	
Mischvorgang	D	E		F						

3.2.2.3 Betonrezeptur für hochfesten Beton (HPC)

Auch bei den Vorversuchen zu den hochfesten Rezepturen wurde von einer entsprechenden Standardrezeptur für HPC ausgegangen. Um die gewünschte Verarbeitbarkeit und Konsistenz zu erreichen wurden im Laufe der Untersuchungen die erforderliche Gesamtwassermenge und der Fließmittelgehalt gesteigert.

Tabelle 3-4: Mischungszusammensetzungen Serie M4 (HPC)

	M4-01	M4-02	M4-03	M4-04	M4-05	M4-06	M4-07	M4-08	M4-09	
Zuschlag 0/4 [kg/m ³]	1.611,0	1.605,6	1.581,5	1.553,8	1.527,8	1.529,9	1.518,5	1.462,3	1.463,9	
Zement [kg/m ³]	450,0									
Wasser [kg/m ³]	157,5		166,5	157,5		166,5	166,5		180,0	
Fliesmittel [kg/m ³]	20,3	22,5				27,0		22,5		
Stahlfasern [kg/m ³]	0,0									
Mikrosilika [kg/m ³]	45,0						90,0			
Quarzmehl [kg/m ³]	45,0			90,0	112,5	90,0				
Summe [kg/m ³]	2.328,8	2.325,6	2.310,5	2.296,3	2.292,8	2.281,4	2.162,0	2.195,8	2.206,4	
W/Z-Wert	0,35		0,37	0,35		0,37	0,37		0,40	
W/B-Wert	0,359	0,364	0,382	0,364		0,382	0,382	0,358	0,375	
Luftporen [%]	-	-	-	-	-	-	2,15	2	2,05	
Mischvorgang	C									

3.3 Versuchsdurchführung

3.3.1 Mischvorgang

Die Mischungen wurden im Labormaßstab mittels eines Intensivmischers gemäß ÖNORM EN 196-1 der Firma Toni Technik hergestellt.

Es wurde pro Charge eine Frischbetonmenge von $2,3 \text{ dm}^3$ hergestellt, die für die Herstellung von drei Prüfkörpern sowie die Bestimmung des Fließmaßes und des Luftporengehalts ausreicht.

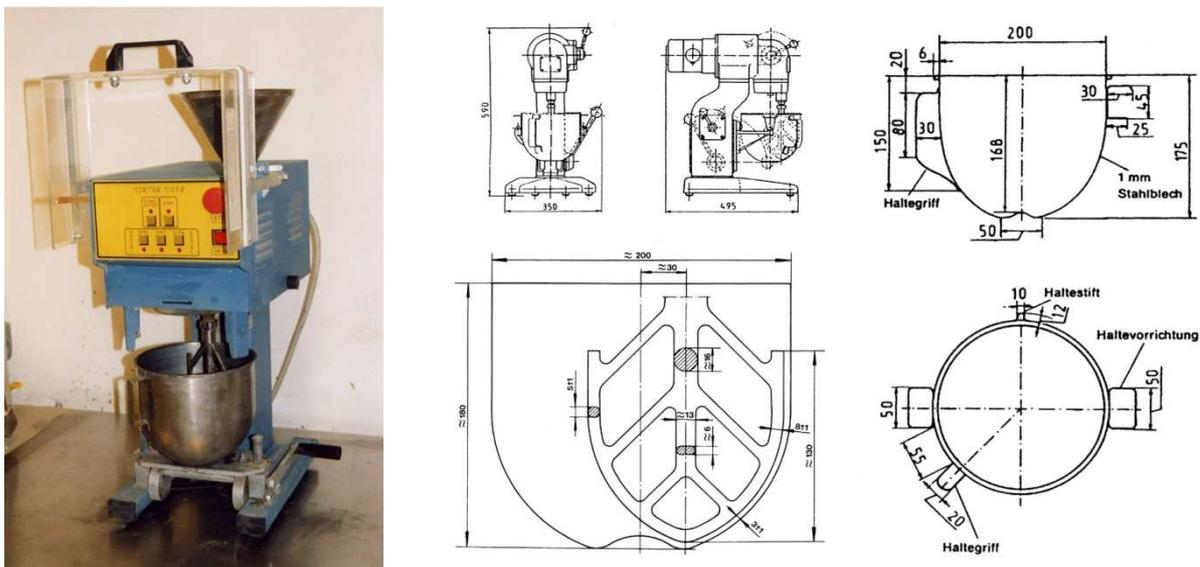


Abbildung 3-5: Mörtelmischer gemäß ÖNORM EN 196-1

Die Geschwindigkeitsstufen des Mörtelmischers, die den Vorgaben der ÖNORM EN 196-1 entsprechen, sind in nachfolgender Tabelle angeführt.

Tabelle 3-5: Drehzahlen der Mischschaufel

Geschwindigkeit	Rührerdrehung	Umlauf um Antriebsachse
	$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{min}^{-1}]$
slow	140 ± 5	62 ± 5
fast	285 ± 10	125 ± 10

Im Rahmen der Vorversuche wurde der in [9] angeführte Mischvorgang variiert und die Auswirkungen unterschiedlicher Intensitäten und Mischzeiten auf die Fließfähigkeit und Konsistenz des Frischbetons untersucht.

Tabelle 3-6: Geteste Mischvorgänge

Bezeichnung	Beschreibung	Geschw.	Dauer
A	1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen	slow	1 min
	2. Hälfte Zuschlag begeben	slow	0,5 min
	3. Wasser/Fliessmittel (vorher vermisch) begeben	fast	2,5 min
	4. Restlichen Zuschlag begeben	fast	2 min
	Gesamtdauer Mischvorgang		
B	1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen	slow	1 min
	2. Hälfte Zuschlag begeben	slow	0,5 min
	3. Wasser/Fliessmittel (vorher vermisch) begeben	fast	1,5 min
	4. Restlichen Zuschlag begeben	fast	2 min
	Gesamtdauer Mischvorgang		
C	1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen	slow	1 min
	2. Hälfte Zuschlag begeben	slow	0,5 min
	3. Wasser begeben	slow	0,5 min
	4. Fliessmittel begeben	fast	3 min
	5. Restlichen Zuschlag begeben	fast	3 min
	Gesamtdauer Mischvorgang		
D	1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen	slow	1 min
	2. Hälfte Zuschlag begeben	slow	1 min
	3. Wasser/Fliessmittel (vorher vermisch) begeben	slow	3 min
	4. Restlichen Zuschlag begeben	slow	3 min
	Gesamtdauer Mischvorgang		
E	1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen	slow	1 min
	2. Hälfte Zuschlag begeben	slow	1 min
	3. Wasser/Fliessmittel (vorher vermisch) begeben	fast	3 min
	4. Restlichen Zuschlag begeben	fast	3 min
	Gesamtdauer Mischvorgang		
F	1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen	slow	1 min
	2. Hälfte Zuschlag begeben	slow	0,5 min
	3. Wasser begeben	slow	0,5 min
	4. Fliessmittel begeben	fast	3 min
	5. Restlichen Zuschlag begeben	fast	3 min
	6. Stahlfasern begeben	fast	2 min
	Gesamtdauer Mischvorgang		

Es hat sich gezeigt, dass die Fließfähigkeit des Betons deutlich erhöht werden kann, je länger und intensiver die Ausgangsstoffe vermischt werden. Die Mischungen M1-06, M1-07 und M1-08 weisen die gleiche Rezeptur auf, wurden aber mit unterschiedlicher Mischdauer und Intensität hergestellt. Abbildung 3-6 zeigt die Auswirkungen einer längeren Mischdauer auf das Fließmaß bei gleichbleibender Mischungszusammensetzung.

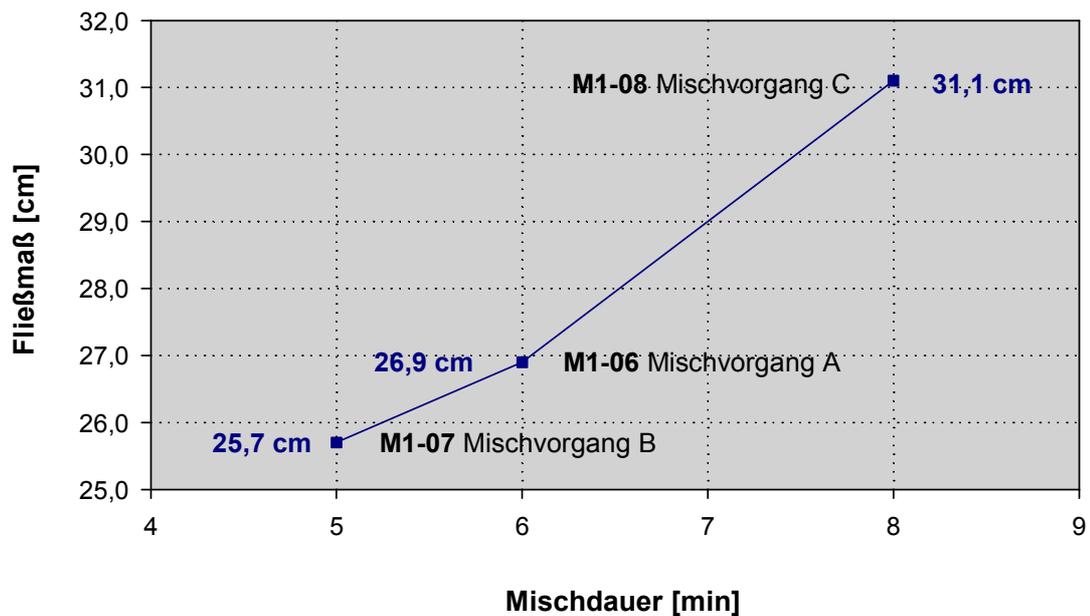


Abbildung 3-6: Auswirkung verschiedener Mischvorgänge auf die Fließfähigkeit

Allerdings bewirkte ein intensivierter Mischvorgang den Einschlag größerer Mengen an Luft in das Mischgut. Die so entstandenen Luftporen führten zu leichten Entmischungserscheinungen, da sie kleine Mengen an Mikrosilika aus der flüssigen Matrix lösten und diese an die Oberfläche der Probekörper transportierten. Eine mögliche Maßnahme zur Reduktion des Luftschlages zeigte SCHACHINGER (beschrieben in [7]). Wird das Mischgut in der letzten Mischphase mit einem Umgebungsunterdruck von 40 mbar beaufschlagt, kann die überschüssige Luft aus dem Frischbeton entfernt werden. Aufgrund fehlender Laboreinrichtungen wurde in der vorliegenden Arbeit aber auf diese Maßnahme verzichtet.

3.3.2 Frischbetonprüfungen

3.3.2.1 Fließmaß

Am Frischbeton wurde in Anlehnung an das Ausbreitmaß gemäß ÖNORM B 3343, Prüfverfahren für Mauer- und Putzmörtel, das Fließmaß bestimmt.

Der frisch gemischte Beton wurde in den in Abbildung 3-7 dargestellten Setztrichter in einer Schicht ohne Aufbringen von Verdichtungsenergie eingefüllt. Danach wurde der Trichter lotrecht hochgezogen und nach etwa 15 Sekunden der Durchmesser des

ausgebreiteten Kuchens in zwei zueinander orthogonalen Richtungen gemessen. Das Fließmaß wurde als arithmetisches Mittel der beiden Durchmesser bestimmt.

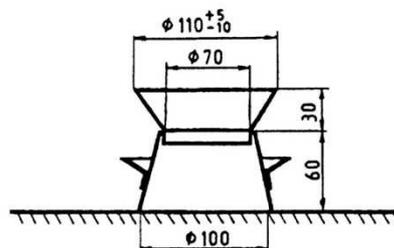
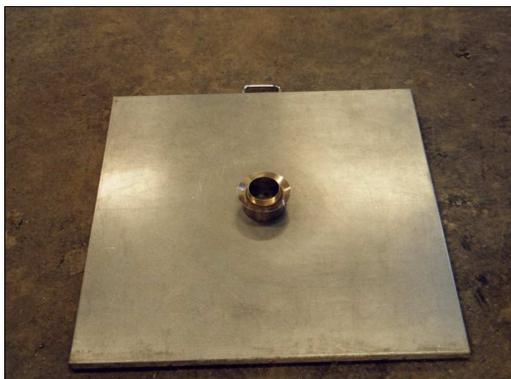


Abbildung 3-7: Bestimmung des Fließmaßes, Setztrichter

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in Kapitel 3.4.1 angeführt.

3.3.2.2 Luftporengehalt

Der Luftporengehalt wurde mit dem Druck-Ausgleichsverfahren in Anlehnung an ÖNORM B 3343 bestimmt. Dabei wird der Frischbeton in das in Abbildung 3-8 dargestellte Prüfgerät für Frischmörtel mit einem Fassungsvermögen von 1 dm^3 eingebracht und über den angezeigten Druckabfall der Luftporengehalt bestimmt.

Es wurde pro Charge eine Messung vorgenommen und der ermittelte Einzelwert als Volumenanteil in Prozent angegeben.

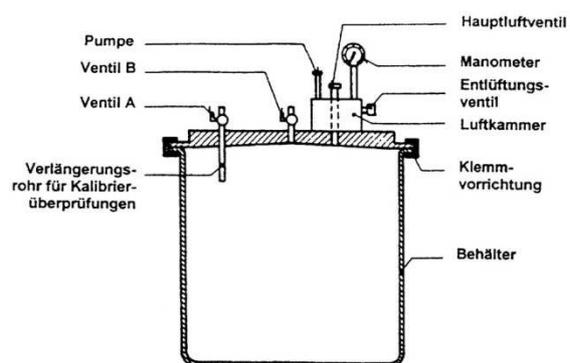


Abbildung 3-8: Prüfgerät zur Bestimmung des Luftporengehalts

3.3.3 Herstellung der Probenkörper

Die fertige Mischung wurde in Prismenschalungen gemäß ÖNORM EN 196-1 eingebracht.

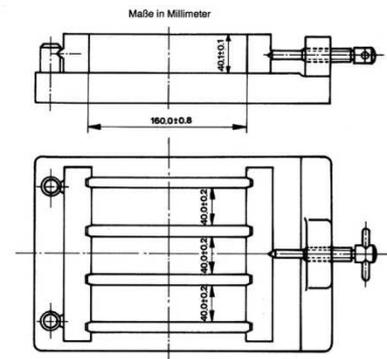


Abbildung 3-9: Form für prismatische Probekörper gemäß ÖNORM EN 196-1

Es wurden pro Mischung drei Prismen mit den Abmessungen 40 × 40 × 160 mm hergestellt.

3.3.4 Nachbehandlung

Die Prismen wurden 24 Stunden bei Norm-Raumklima (20 °C) in der Form belassen und vor Stoß, Rütteln und Austrocknen geschützt. Anschließend erfolgte die normgemäße Lagerung im Wasserbad bis zum Zeitpunkt der Festigkeitsprüfung.



Abbildung 3-10: Lagerung der Probekörper im Wasserbad

3.3.5 Festbetonprüfungen

Die Prüfungen des Festbetons erfolgten frühestens 28 Tage nach Herstellung der Probekörper. Die Prüfprismen wurden maximal 0,5 Stunden vor der Prüfung aus dem Wasserbad genommen und bis zur Prüfung zum Schutz vor Austrocknen in feuchte Tücher eingeschlagen.

3.3.5.1 Biegezugfestigkeit

Mittels der Dreipunkt-Biegezugprüfung wurde in Anlehnung an Prüfverfahren für Zement gemäß ÖNORM EN 196-1 die Biegezugfestigkeit der prismatischen Probekörper bestimmt.

Die Prüfung erfolgte mit einer servohydraulischen Prüfmaschine der Firma Zwick, Typ Z 250.



Abbildung 3-11: Prüfmaschine zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit

Der Lastangriff erfolgte mittig bei einer Auflagerstützweite von 100 mm. Die Prüfung wurde kraftgesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,06 N/mm²s durchgeführt.

Die Biegezugspannung für den Bruchzustand f_{ct} wurde mit Gleichung 3-1 ermittelt.

$$f_{ct} = 1,5 \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

F_{max}	mittig aufgebrachte Bruchlast [N]
l	Auflagerstützweite [mm]
d_1	Breite des Prüfkörpers [mm]
d_2	Höhe des Prüfkörpers [mm]

Gleichung 3-1: Biegezugfestigkeit

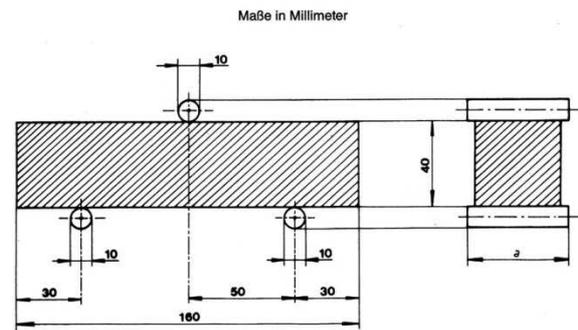
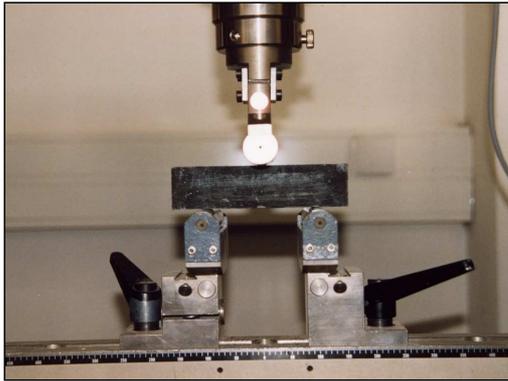


Abbildung 3-12: Prüfungsanordnung beim Dreipunkt-Biegezugversuch

Die in Kapitel 3.4.3 angeführten Kennwerte der Biegezugspannungen f_{ctm} entsprechen dem arithmetischen Mittel der Einzelproben innerhalb einer Stichprobengruppe von drei Proben. Bei einer Abweichung eines einzelnen Prüfwertes von mehr als $\pm 10\%$ vom Mittelwert wurde dieser ausgeschieden und das arithmetische Mittel der beiden restlichen Prüfkörper als Kennwert der Biegezugspannung herangezogen.

3.3.5.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde an den Prismenreststücken aus der Biegezugprüfung mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 62,5$ mm in Anlehnung an ÖNORM EN 196-1 ermittelt. Die Prüfmaschine der Firma TONI Technik, Modell 2040, Baujahr 1997 weist eine maximale Prüfkraft von 3.000 kN auf.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgte mittels eines kraftgesteuerten, zentrischen Druckversuchs mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von $0,6 \text{ N/mm}^2\text{s}$.

Die Druckfestigkeit f_c wurde nach Gleichung 3-2 berechnet.

$$f_c = \frac{F_{\max}}{A_c}$$

F_{\max} mittig aufgebrachte Bruchlast [N]

A_c Fläche des wirksamen Probenquerschnitt [mm^2]

Gleichung 3-2: Druckfestigkeit

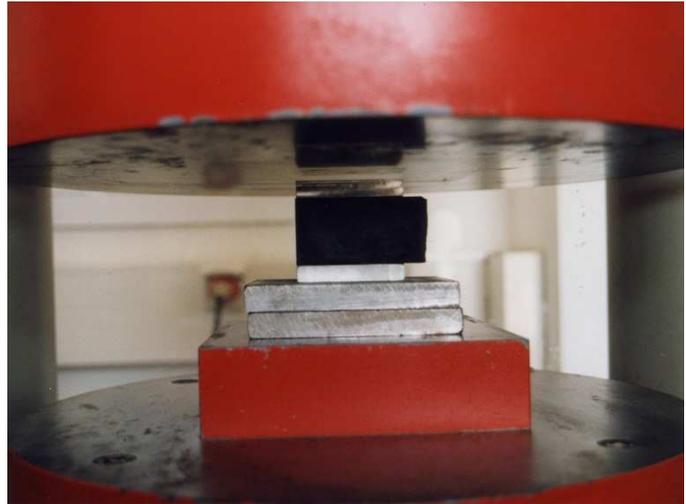


Abbildung 3-13: Prüfmaschine und Prüfungsanordnung, Druckfestigkeitsprüfung

Das Prüfergebnis wurde als arithmetisches Mittel von sechs Druckfestigkeitswerten angegeben, die an einem Kollektiv von drei Prismen ermittelt worden sind. Wenn ein Einzelwert aus den sechs Bestimmungen mehr als $\pm 10\%$ vom Mittelwert abwich, wurde dieser verworfen und der Mittelwert aus den verbleibenden fünf Einzelwerten bestimmt.

Die Kennwerte der Druckfestigkeiten sind in Kapitel 3.4.3 angegeben.

3.4 Auswertung

3.4.1 Frischbetonkennwerte

Die Ergebnisse der in 3.3.2 beschriebenen Frischbetonprüfungen sind in den nachfolgenden Kapiteln zusammengestellt.

3.4.1.1 Fließmaß UHPC – Ultrahochfester Beton

Tabelle 3-7: Fließmaß UHPC

Mischungsbezeichnung		gemessene Durchmesser		Fließmaß
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d [cm]
UHPC1	M1-01	271	274	27,3
	M1-02	277	281	27,9
	M1-03	302	308	30,5
	M1-04	297	298	29,8
	M1-05	284	285	28,5
	M1-06	267	271	26,9
	M1-07	256	257	25,7
	M1-08	310	312	31,1
	M1-09	313	315	31,4
	M1-10	295	297	29,6
	M1-11	275	277	27,6
	M1-12	287	290	28,9
	M1-13	291	293	29,2
UHPC2	M1-14	267	269	26,8
	M1-15	298	300	29,9
	M1-16	306	307	30,7
	M1-17	312	314	31,3
	M1-18	300	302	30,1
	M1-19	321	324	32,3

Als Zielwert für das in Anlehnung an ÖNORM B 3343 bestimmte Fließmaß wurde für die UHPC-Mischungen ein Wert von wenigstens 30 cm vorgegeben.

Dieses Kriterium wurde nur von den Mischungen M1-03, M1-08 und M1-09 beim UHPC1 und den Mischungen M1-16, M1-17, M1-18 und M1-19 beim UHPC2 erfüllt.

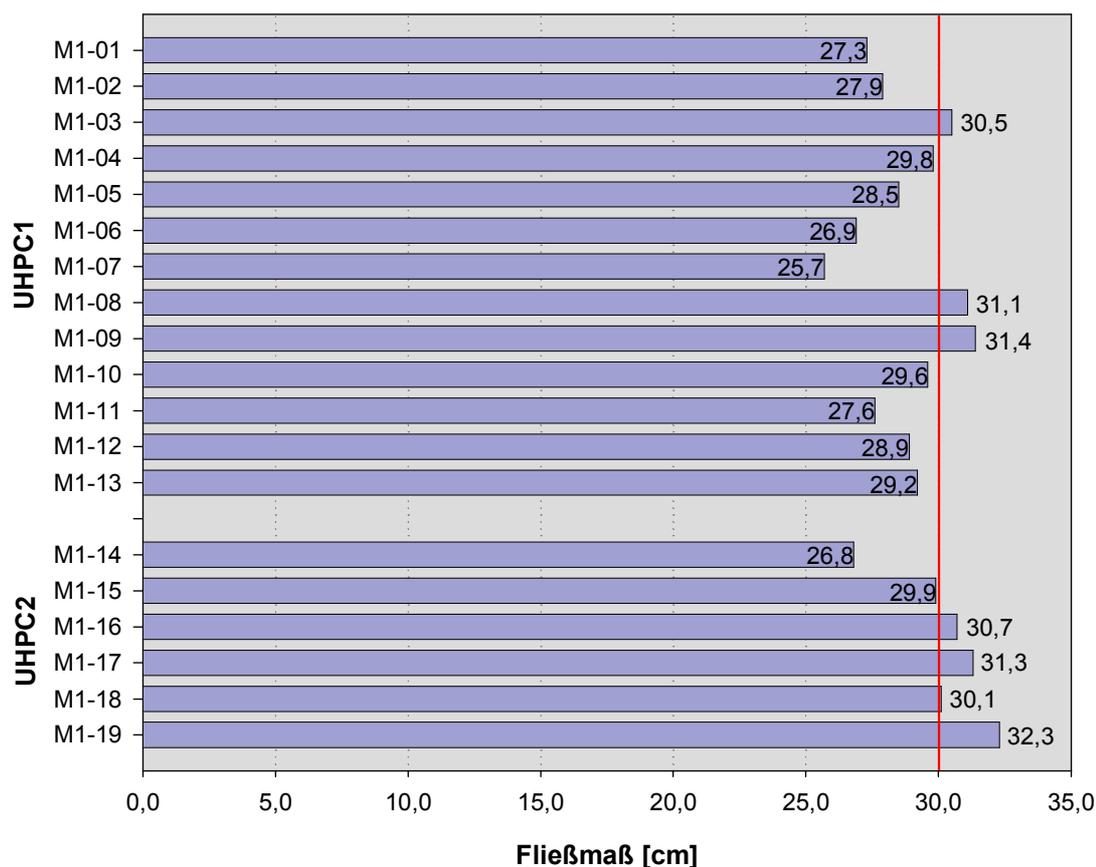


Abbildung 3-14: Fließmaß UHPC

Abbildung 3-15 zeigt den Einfluss der Fließmitteldosierung auf das Fließmaß. Bis zu einem Anteil von 5,5 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, kann durch den Zusatz von Hochleistungsverflüssiger das Fließmaß stetig gesteigert werden ohne die Gefügestabilität nachteilig zu beeinflussen.

Bei Fließmittelgehalten von 5,5 M.-% bis 6,0 M.-% ist eine Stagnation der verflüssigenden Wirkung erkennbar, die Betonzusammensetzung nähert sich der kritischen Fließgrenze.

Eine Dosierung über 6,0 M.-% führt zu einer raschen Destabilisierung der Mischung, die Zuschlagskörner können von dem Wasser-Mehlkorn-Gemisch nicht mehr in der Schwebe gehalten werden. Die Folge sind starke Entmischungserscheinungen in Form von Sedimentation des Zuschlags, Aufschwimmen von Feinstpartikeln bzw. Bluten.

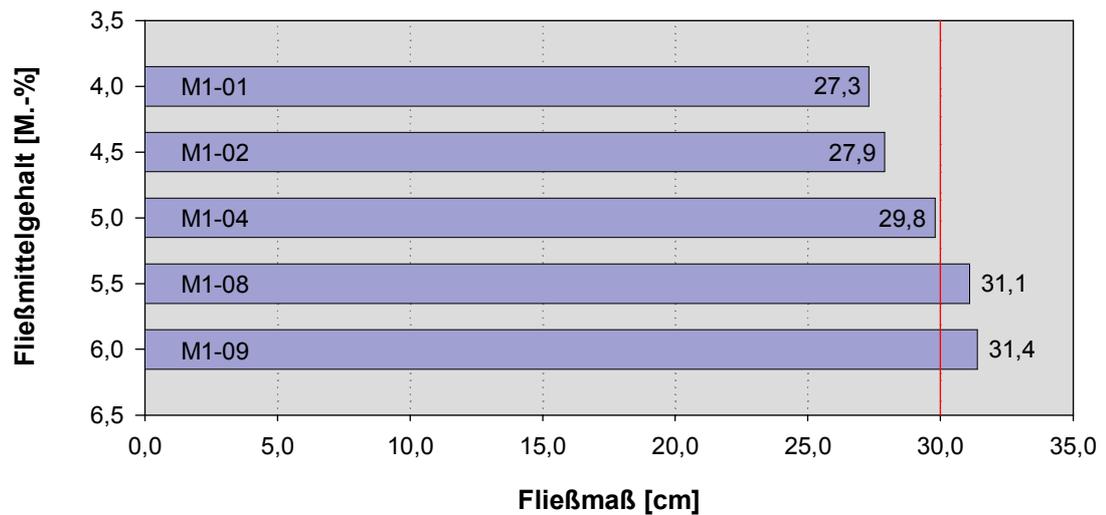


Abbildung 3-15: Einfluss des Fließmittelgehalts auf das Fließmaß

In Abbildung 3-16 ist die bereits in Kapitel 3.3.1 erläuterte Abhängigkeit des Fließmaßes von der Mischdauer dargestellt. Nur durch einen langen und intensiven Mischvorgang von wenigstens acht Minuten kann eine ausreichende Homogenisierung der Mischung erreicht werden, die für eine fließfähige Konsistenz erforderlich ist.

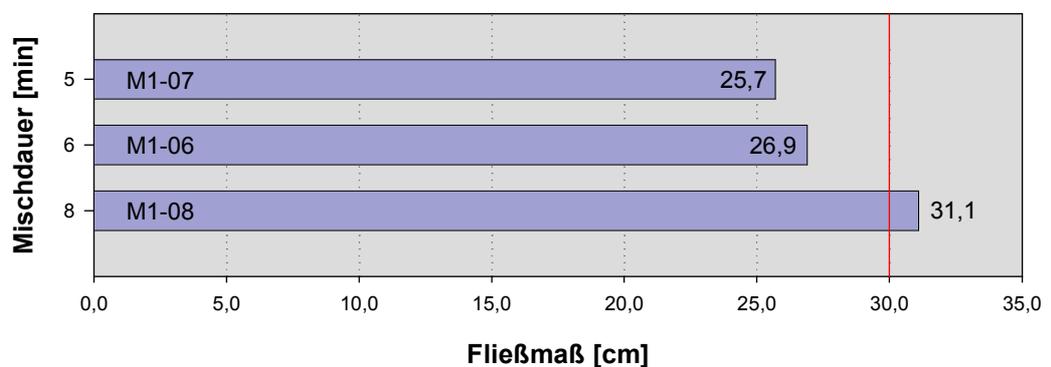


Abbildung 3-16: Einfluss der Mischdauer auf das Fließmaß

Aufgrund der hohen Fließmittelgehalte zeigten alle Mischungen eine mehr oder weniger ausgeprägte Tendenz zum Entmischen. Daher wurde versucht durch die Zugabe von feinkörnigem Quarzmehl den Feststoffanteil im Zementleim zu erhöhen, um eine stabilere Wasser-Feststoff-Suspension zu erreichen.

Abbildung 3-17 stellt die getesteten Mischungen mit Quarzmehlgehalten von 12 M.-% bzw. 24 M.-% gegenüber. Die Frischbetone M1-11 und M1-13 weisen zwar eine höhere Gefügestabilität auf, bleiben aber in ihrer Fließfähigkeit deutlich hinter den quarzmehlrärmeren Mischungen M1-05 und M1-10 zurück. Dies liegt daran, dass die vorhandene Fließmittelmenge nicht mehr ausreicht, um die Feststoffpartikel in der Suspension hinreichend zu dispergieren. Es kommt zu einer verstärkten Agglomeration der Partikel, einer Reduktion der mittleren Wasserschichtdicke und einer dadurch bedingten Abnahme der Viskosität.

Der Einfluss der Fließmittelmenge auf die Agglomeratbildung wird deutlich, wenn man die Fließmaßdifferenz der Mischungen in Abhängigkeit vom Fließmittelgehalt vergleicht. Der höhere Quarzmehlgehalt verursacht bei den fließmittelärmeren Mischungen eine Fließmaßdifferenz von 0,9 cm. Bei den Mischungen mit höherem Fließmittelanteil hingegen beträgt die Differenz nur 0,4 cm.

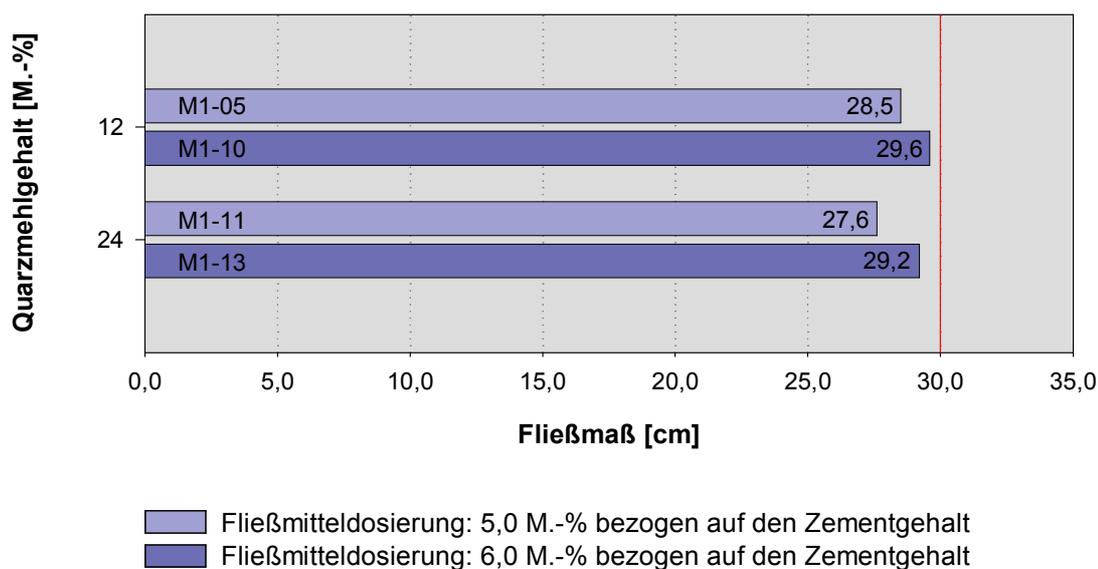


Abbildung 3-17: Einfluss des Quarzmehlgehalts auf das Fließmaß

Die Zugabe von Stahlfasern bewirkte eine deutliche Verbesserung des Fließmaßes, wie aus Abbildung 3-18 hervorgeht.

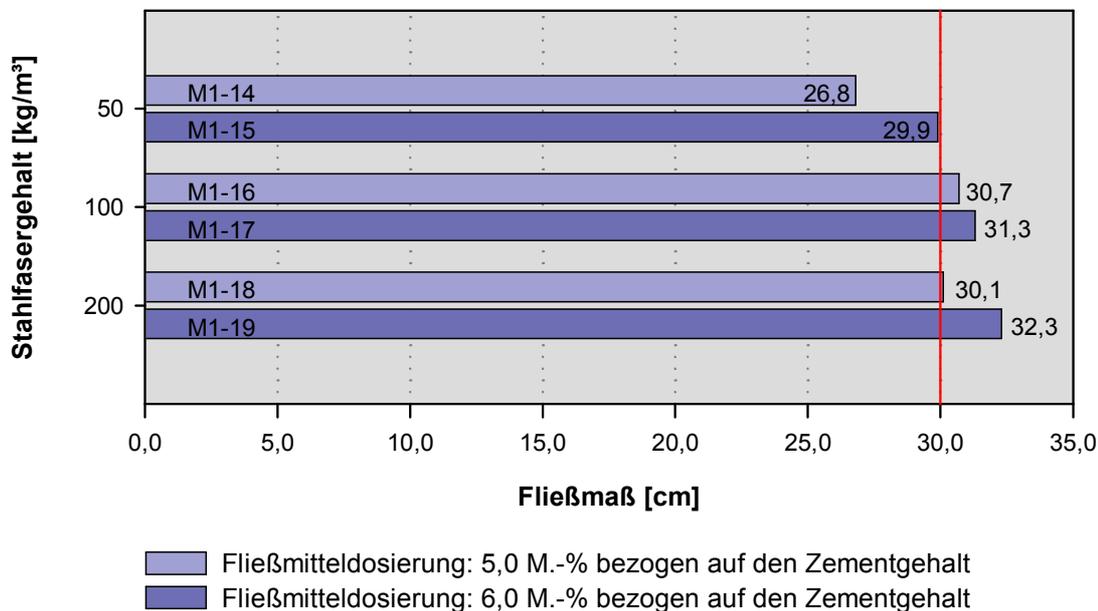


Abbildung 3-18: Einfluss des Stahlfasergehalts auf das Fließmaß

Im Gegensatz zu konventionellen Betonen, bei denen die Zugabe von Stahlfasern zu einer nachweislichen Verschlechterung der Viskosität führt, verbessern die Fasern im UHPC dessen Frischbetoneigenschaften. In Betonen mit grobkörnigen Zuschlägen verursachen Fasern in der Größenordnung der Zuschlagskörner eine Störung des Mischguts und führen so zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit. Beim UHPC hingegen werden die Fasern von den vergleichsweise kleinen Zuschlagskörnern vollständig umgeben und besser in die Matrix eingebettet (Abbildung 3-19).

Das Fließverhalten ultrahochfester Betone wird somit auch durch das Verhältnis von Faserlänge und Korndurchmesser beeinflusst. Eine positive Beeinflussung kann allerdings nur bis zu bestimmten Fasergehalten beobachtet werden. Zu große Fasermengen können sich nicht mehr gleichmäßig in der Suspension verteilen, es kommt zur Bildung von Faserklumpen und zu einer deutlichen Verschlechterung der Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit.

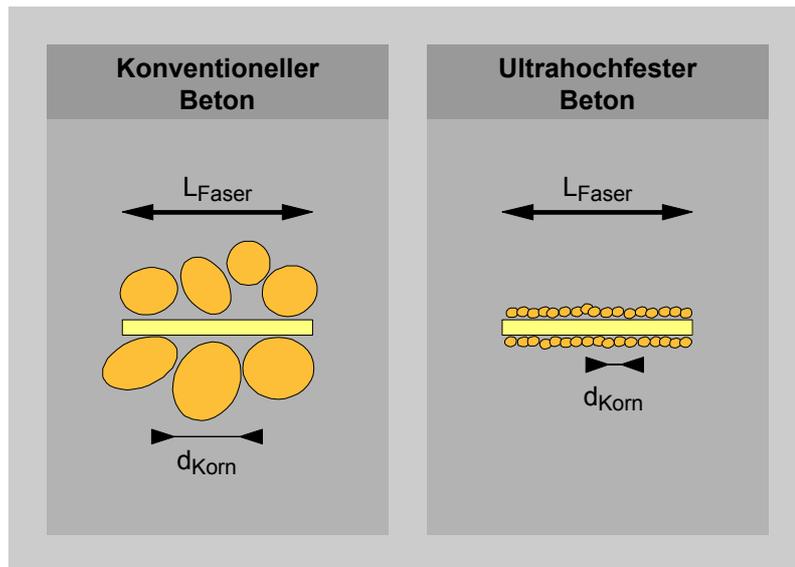


Abbildung 3-19: Faser-Einbindung in unterschiedlichen Betonen nach [6]

Die nachfolgende Abbildung 3-20 zeigt zwei Beispiele unterschiedlicher Fließmaße. Die Mischung M1-09 (rechtes Bild) weist ein für die Hauptversuche geeignetes Fließmaß von 31,4 cm auf. Mischung M1-01 (linkes Bild) hingegen erreicht ein unzureichendes Fließmaß von lediglich 27,3 cm.



Abbildung 3-20: Fließmaß

3.4.1.2 Fließmaß HPC – Hochfester Beton

Tabelle 3-8: Fließmaß HPC

Mischungsbezeichnung		gemessene Durchmesser		Fließmaß
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d [cm]
HPC	M4-01	222	226	22,4
	M4-02	248	253	25,1
	M4-03	269	273	27,1
	M4-04	268	272	27,0
	M4-05	251	254	25,3
	M4-06	270	272	27,1
	M4-07	282	285	28,4
	M4-08	278	280	27,9
	M4-09	286	289	28,8

Der für die HPC-Mischungen vorgegebene Zielwert für das Fließmaß von 28,0 cm konnte nur mit den Mischungszusammensetzungen M4-07 und M4-09 erreicht werden.

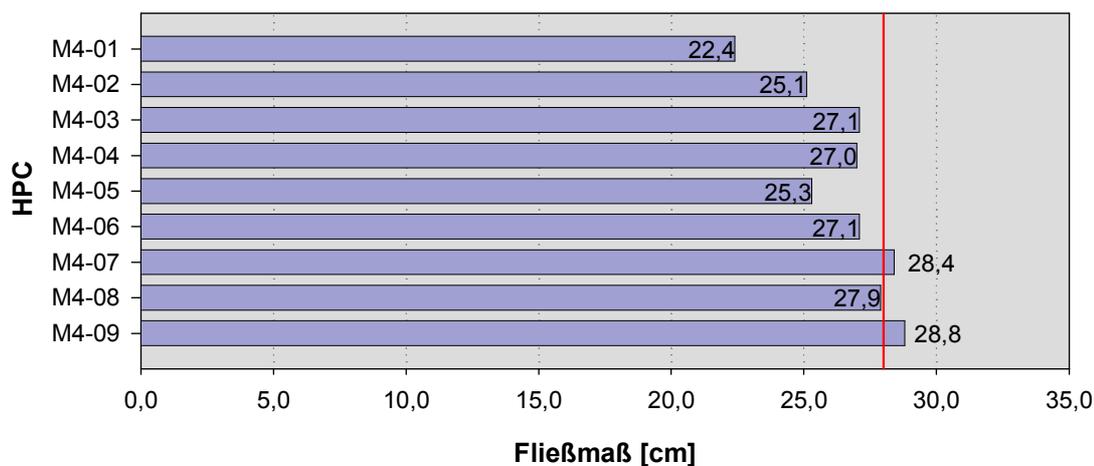


Abbildung 3-21: Fließmaß HPC

Wie schon beim UHPC erläutert, kann eine Verbesserung der Fließfähigkeit durch die Erhöhung der Fein- und Feinstkornanteile erzielt werden.

Abbildung 3-22 zeigt den Einfluss des Mikrosilikagehalts auf das Fließmaß der hochfesten Mischungen M1-06 und M1-09, deren Zusammensetzung sich nur durch die beigegebene Menge Silikastaub unterscheidet. Eine Erhöhung von 45 kg/m³ (10 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt) auf 90 kg/m³ (20 M.-%) bewirkt eine Steigerung der Fließfähigkeit um ca. 6 %.

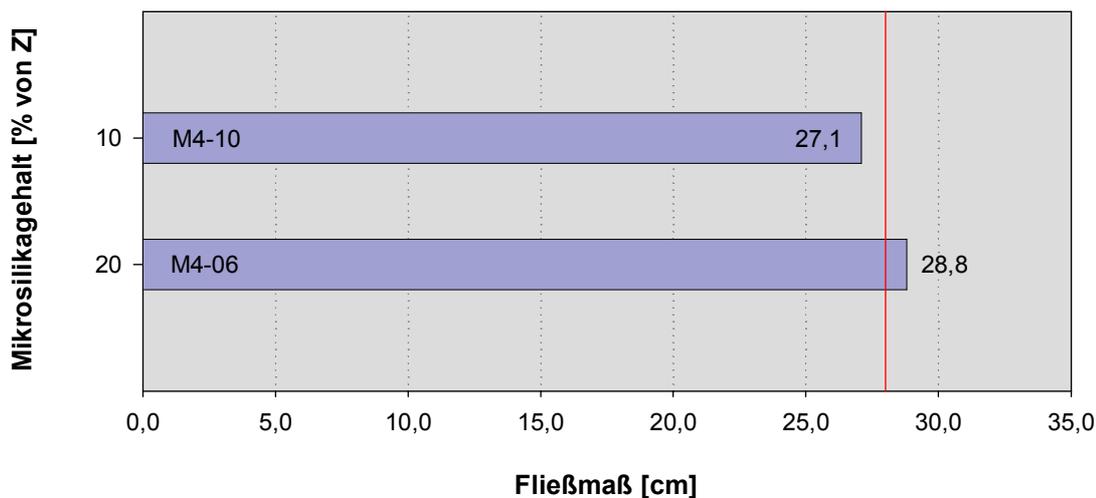


Abbildung 3-22: Einfluss des Mikrosilikagehalts auf das Fließmaß

3.4.2 Entmischungerscheinungen

Neben der Bestimmung des Fließmaßes wurde eine visuelle Beurteilung der Frischbetonkonsistenz hinsichtlich etwaiger Entmischungerscheinungen vorgenommen. Tabelle 3-9 gibt einen Überblick über die Qualität der Rezepturen.

Tabelle 3-9: Entmischungerscheinungen

Mischungsbezeichnung	Entmischungerscheinungen	
UHPC1	M1-01	kein Entmischen
	M1-02	kein Entmischen
	M1-03	kein Entmischen
	M1-04	kein Entmischen
	M1-05	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-06	kein Entmischen
	M1-07	kein Entmischen
	M1-08	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-09	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-10	starkes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-11	starkes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-12	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-13	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika

UHPC2	M1-14	kein Entmischen
	M1-15	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-16	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-17	starkes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-18	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M1-19	starkes Aufschwimmen von Mikrosilika
HPC	M4-01	kein Entmischen
	M4-02	kein Entmischen
	M4-03	Bluten
	M4-04	leichtes Aufschwimmen von Mikrosilika
	M4-05	kein Entmischen
	M4-06	leichtes Absetzen von Zuschlag
	M4-07	leichtes Absetzen von Zuschlag
	M4-08	kein Entmischen
	M4-09	kein Entmischen

Die beschriebenen Entmischungserscheinungen sind exemplarisch in Abbildung 3-23 dargestellt. Das linke Bild zeigt Mischung M1-10, bei der durch die beim intensiven Mischen eingetragene Luft Mikrosilika-Partikel aus der Matrix gelöst wurden und sich an der Frischbetonoberfläche abgesetzt haben. Im rechten Bild ist das durch eine zu hohe Dosierung des Fließmittels verursachte Bluten dargestellt. Die hellbraune Färbung entsteht durch aufschwimmendes Quarzmehl, das vom austretenden Wasser aus der Matrix gelöst und an die Oberfläche transportiert wurde.

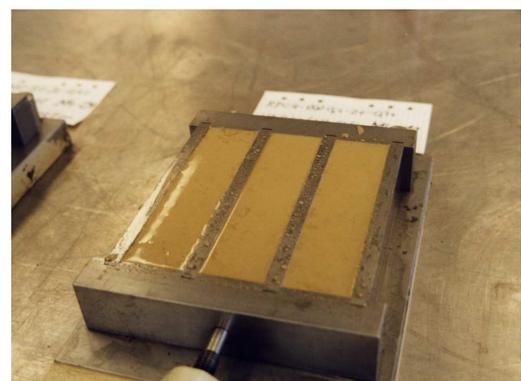
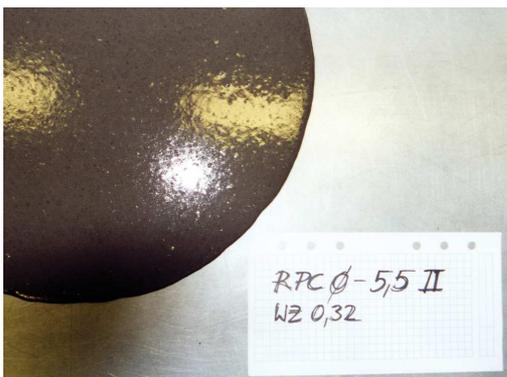


Abbildung 3-23: Entmischungserscheinungen

3.4.3 Festbetoneigenschaften

Die nachfolgenden Tabellen und Abbildungen beinhalten die in den Festbetonprüfungen (vgl. Kapitel 3.3.5) ermittelten Kennwerte der Festigkeiten der drei Prüfserien.

In den Tabellen der Festigkeitskennwerte sind die wegen zu großer Abweichungen vom Mittelwert ausgeschiedenen Einzelwerte gelb markiert.

Des Weiteren sind Fehlstellen an den Prüfkörpern vermerkt, die bei einer signifikanten Beeinflussung des Prüfergebnisses zu einem Ausscheiden des jeweiligen Einzelwertes führten.

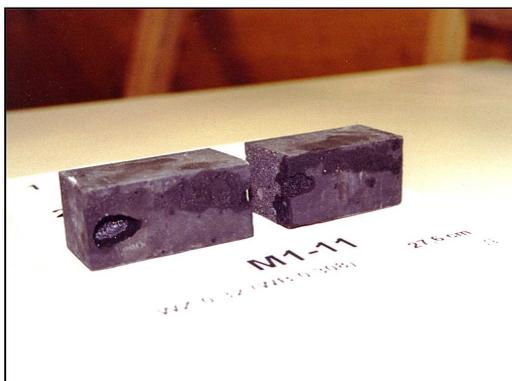


Abbildung 3-24: Fehlerhafte Prüfkörper

Die Bedeutung der in Tabelle 3-10 und Tabelle 3-11 verwendeten Abkürzungen kann der folgenden Legende entnommen werden.

Legende	d ₁	Breite Prüfkörper	f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm ²	
	d ₂	Höhe Prüfkörpers	f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm ²	
		Ausgeschiedener Wert, Abweichung > ±10% vom Mittelwert			
	1	Lunker ausserhalb der Bruchzone an der Prismenunterseite			
	2	Lunker in der Bruchzone an der Prismenunterseite			
	3	Lunker ausserhalb der Druckzone			
4	Lunker in der Druckzone am seitlichen (a), oberen (b) Prismenrand				

3.4.3.1 Druck- und Biegezugfestigkeit - UHPC1

Tabelle 3-10: Festigkeitskennwerte UHPC1

Probennummer	Abmessungen		Biegezugprüfung				Druckprüfung			
	d ₁	d ₂	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.
	[mm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]	
M1-01/1	40,3	39,8	7.626,39	17,70	4,27	-	331,95	132,78	13,91	-
							316,84	126,74	8,73	-
M1-01/2	40,2	39,8	7.165,76	16,71	1,54	-	275,18	110,07	5,57	-
							291,80	116,72	0,13	-
M1-01/3	40,5	39,8	7.185,48	16,51	2,73	-	276,29	110,52	5,19	-
							296,96	118,78	1,90	-
			f_{ctm}	16,97			f_{cm}	116,57		
M1-02/1	39,2	39,8	6.527,69	16,01	5,67	-	269,84	107,94	6,13	-
							287,15	114,86	0,11	-
M1-02/2	39,8	39,9	6.527,69	15,49	8,73	-	301,19	120,48	4,77	-
							279,84	111,94	2,65	-
M1-02/3	39,2	39,8	6.956,06	17,06	0,52	-	287,88	115,15	0,14	-
							298,89	119,56	3,97	-
			f_{ctm}	16,19			f_{cm}	114,99		
M1-03/1	40,4	40,0	7.129,92	16,38	3,49	-	312,81	125,12	2,77	-
							308,09	123,24	1,22	-
M1-03/2	39,5	39,8	6.862,86	16,58	2,33	-	312,00	124,80	2,50	-
							312,75	125,10	2,75	-
M1-03/3	40,5	39,9	7.160,39	16,41	3,31	-	294,26	117,70	3,32	-
							286,35	114,54	5,92	-
			f_{ctm}	16,46			f_{cm}	121,75		
M1-04/1	39,8	39,9	6.192,52	14,70	86,87	-	306,01	122,40	0,33	-
							310,48	124,19	1,12	-
M1-04/2	39,9	39,9	5.570,58	13,15	88,25	-	314,72	125,89	2,51	-
							227,54	91,02	25,89	-
M1-04/3	39,8	39,9	6.801,92	16,14	85,58	-	311,65	124,66	1,51	-
							292,28	116,91	4,80	-
			f_{ctm}	14,66			f_{cm}	122,81		
M1-05/1	39,7	40,2	6.311,67	14,94	13,59	-	260,08	104,03	17,36	-
							278,72	111,49	11,44	-
M1-05/2	39,9	40,2	6.213,11	14,56	10,70	-	243,81	97,52	22,53	-
							293,65	117,46	6,69	-
M1-05/3	39,8	39,5	6.770,44	16,23	23,39	-	296,56	118,62	5,77	-
							296,62	118,65	5,75	-
			f_{ctm}	15,25			f_{cm}	114,05		
M1-06/1	40,3	39,9	6.258,93	14,49	0,51	-	278,06	111,22	14,05	-
							278,55	111,42	14,25	-
M1-06/2	39,5	39,8	6.685,52	16,15	10,90	-	286,55	114,62	17,53	-
							286,28	114,51	17,42	-
M1-06/3	40,4	39,9	8.476,09	19,52	34,07	-	305,08	122,03	25,13	-
			f_{ctm}	15,32			f_{cm}	113,80		

M1-07/1	40,1	40,0	4.862,68	11,34	89,87	-	220,14	88,06	3,06	-
							196,67	78,67	7,93	-
M1-07/2	40,1	39,9	6.520,62	15,24	86,38	-	237,58	95,03	11,22	-
							214,00	85,60	0,18	-
M1-07/3	39,7	39,9	3.792,64	9,05	91,92	-	172,96	69,18	19,03	-
							240,28	96,11	12,49	-
			f_{ctm}	11,88			f_{cm}	85,44		
M1-08/1	38,9	39,9	6.584,03	16,36	87,01	-	271,34	108,54	5,23	-
							288,08	115,23	0,62	-
M1-08/2	38,4	39,9	7.250,86	18,49	85,32	-	296,88	118,75	3,69	-
							295,49	118,20	3,20	-
M1-08/3	38,6	39,9	7.286,71	18,39	85,40	-	269,11	107,64	6,01	-
							297,00	118,80	3,73	-
			f_{ctm}	17,74			f_{cm}	114,53		
M1-09/1	40,0	39,9	6.379,68	14,99	86,55	-	298,20	119,28	2,37	-
							319,79	127,92	4,69	-
M1-09/2	39,0	39,8	6.155,61	15,25	86,31	-	303,36	121,34	0,68	-
							264,16	105,66	13,52	-
M1-09/3	39,5	39,7	8.084,40	19,58	82,43	-	308,41	123,36	0,97	-
							297,50	119,00	2,60	-
			f_{ctm}	15,12			f_{cm}	122,18		
M1-10/1	40,3	39,9	6.818,83	15,94	85,76	-	294,50	117,80	8,45	4b
							281,58	112,63	3,69	4a
M1-10/2	40,6	39,9	5.453,27	12,66	88,69	2	255,06	102,02	6,07	4b
							217,42	86,97	19,93	4a
M1-10/3	40,0	39,8	6.474,75	15,33	86,31	-	258,43	103,37	4,83	-
							268,17	107,27	1,24	-
			f_{ctm}	15,64			f_{cm}	108,62		
M1-11/1	40,7	39,8	5.444,31	12,67	89,94	2	213,28	85,31	23,33	3
							254,99	102,00	8,34	4b
M1-11/2	40,6	39,8	6.861,84	16,00	87,29	-	286,58	114,63	3,02	4a
							276,28	110,51	0,69	-
M1-11/3	40,0	39,8	7.435,30	17,60	86,02	1	271,98	108,79	2,23	-
							301,13	120,45	8,25	4b
			f_{ctm}	16,80			f_{cm}	111,28		
M1-12/1	40,9	40,0	7.568,35	17,35	84,43	1	196,49	78,60	32,24	4b
							296,77	118,71	2,34	4a
M1-12/2	40,3	39,8	7.627,49	17,92	83,91	-	310,28	124,11	6,99	-
							277,67	111,07	4,25	-
M1-12/3	39,3	39,8	7.140,02	17,20	84,56	-	276,67	110,67	4,60	-
							288,59	115,44	0,48	-
			f_{ctm}	17,49			f_{cm}	116,00		
M1-13/1	40,3	39,8	6.570,10	15,44	86,21	-	282,12	112,85	0,54	4a
							295,87	118,35	5,44	4a
M1-13/2	39,7	40,0	7.104,17	16,78	85,01	-	277,96	111,18	0,94	-
							269,05	107,62	4,12	-
M1-13/3	40,0	39,9	6.070,09	14,30	87,23	-	262,43	104,97	6,48	-
							296,19	118,48	5,55	4a
			f_{ctm}	15,50			f_{cm}	112,24		

Die Festigkeitskennwerte der UHPC-Mischungen ohne Stahlfasern sind in Abbildung 3-25 und Abbildung 3-26 graphisch gegenübergestellt.

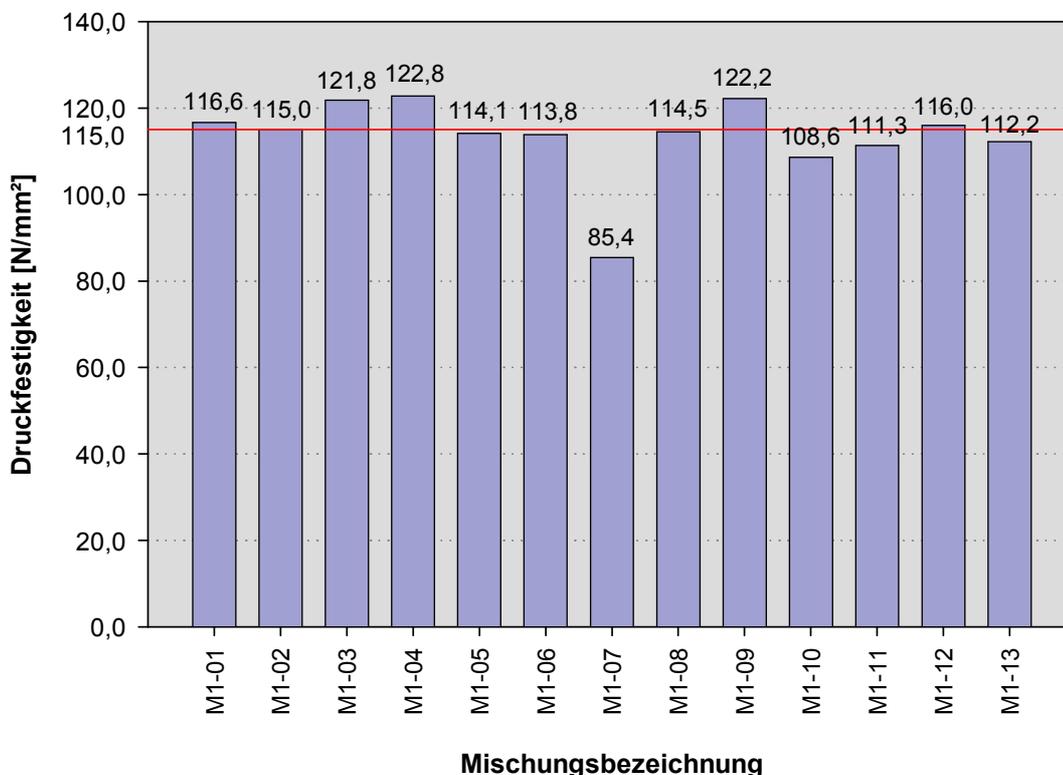


Abbildung 3-25: Kennwerte der Druckfestigkeit UHPC1

Lediglich die Mischungen M1-01, M1-02, M1-03, M1-04, M1-09 und M1-12 wiesen Druckfestigkeiten über 115 N/mm² auf und können somit den ultrahochfesten Betonen zugeordnet werden.

Die signifikant niedrige Druckfestigkeit der Mischung M1-07 kann auf eine unzureichende Homogenisierung der Frischbetonmatrix zurückgeführt werden. Die Mischdauer bei der Herstellung betrug in diesem Fall nur 5 min (Mischvorgang B, vgl. Kapitel 3.3.1).

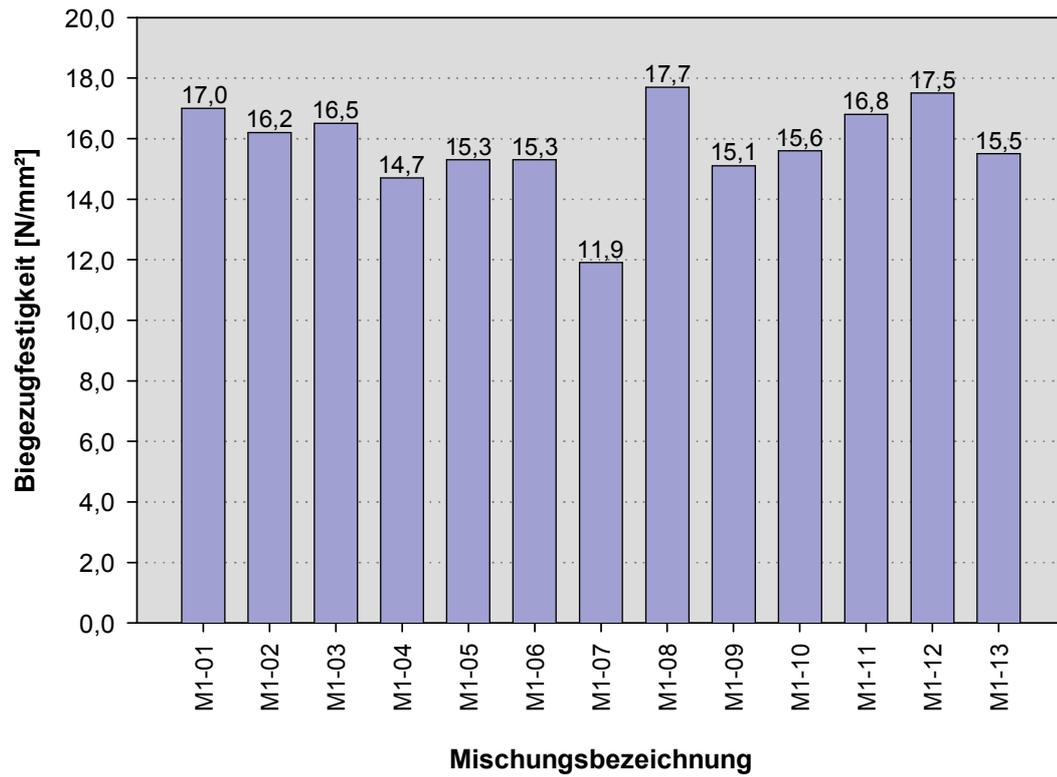


Abbildung 3-26: Kennwerte der Biegezugfestigkeit UHPC1

3.4.3.2 Druck- und Biegezugfestigkeit - UHPC2

Tabelle 3-11: Festigkeitskennwerte UHPC2

Probennummer	Abmessungen		Biegezugprüfung				Druckprüfung			
	d ₁	d ₂	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.
	[mm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]	
M1-14/1	41,3	39,8	7.996,12	18,33	2,20	1	345,74	138,30	3,80	4a
							325,84	130,34	2,18	4b
M1-14/2	39,6	39,9	7.595,15	18,07	0,73	-	307,28	122,91	7,75	-
							352,62	141,05	5,86	-
M1-14/3	39,8	39,8	7.319,49	17,41	2,93	-	277,75	111,10	16,62	-
							333,99	133,60	0,27	-
			f_{ctm}	17,94			f_{cm}	133,24		
M1-15/1	41,1	39,8	7.611,26	17,54	5,20	1	321,53	128,61	2,54	4a
							317,66	127,06	1,31	4b
M1-15/2	41,2	39,8	6.864,81	15,78	5,35	1	291,33	116,53	7,09	4b
							295,92	118,37	5,63	4b
M1-15/3	40,9	40,0	7.283,68	16,70	0,15	1	328,52	131,41	4,77	4b
							326,44	130,58	4,11	4a
			f_{ctm}	16,67			f_{cm}	125,43		
M1-16/1	40,3	39,8	7.559,35	17,76	87,41	-	376,13	150,45	0,57	4a
							372,73	149,09	1,47	4a
M1-16/2	41,0	39,8	7.539,66	17,41	87,65	1	349,75	139,90	7,54	4b
							395,71	158,28	4,61	4b
M1-16/3	40,4	39,9	8.225,25	19,18	86,40	1	378,49	151,40	0,06	4b
							396,83	158,73	4,91	4a
			f_{ctm}	18,12			f_{cm}	151,31		
M1-17/1	40,2	39,8	7.061,62	16,63	4,48	-	367,83	147,13	5,17	-
							368,69	147,48	5,42	-
M1-17/2	40,5	39,8	7.170,91	16,77	3,72	-	375,34	150,14	7,32	-
							356,20	142,48	1,84	4a
M1-17/3	40,7	39,8	6.859,44	15,96	8,35	-	342,37	136,95	2,11	4a
							361,05	144,42	3,23	-
			f_{ctm}	16,45			f_{cm}	144,77		
M1-18/1	40,0	40,0	11.370,4	26,65	58,94	-	426,15	170,46	13,54	-
			429,38	171,75	14,40	-				
M1-18/2	41,1	39,7	8.939,47	20,70	23,46	1	395,81	158,32	5,45	4b
							408,12	163,25	8,73	-
M1-18/3	40,1	39,9	9.250,94	21,74	29,64	-	391,29	156,52	4,25	-
							405,82	162,33	8,12	-
			f_{ctm}	21,22			f_{cm}	163,77		
M1-19/1	39,8	40,0	7.260,41	17,10	87,87	2	379,70	151,88	9,02	4a
							351,02	140,41	0,78	-
M1-19/2	40,0	39,9	6.898,83	16,25	88,48	-	350,81	140,32	0,72	4a
							345,62	138,25	0,77	4b
M1-19/3	40,1	40,0	6.648,22	15,54	88,98	-	316,47	126,59	9,14	-
							346,13	138,45	0,62	-
			f_{ctm}	16,30			f_{cm}	139,32		

Die Festigkeitskennwerte der UHPC-Mischungen mit Stahlfasern sind in Abbildung 3-27 und Abbildung 3-28 graphisch gegenübergestellt.

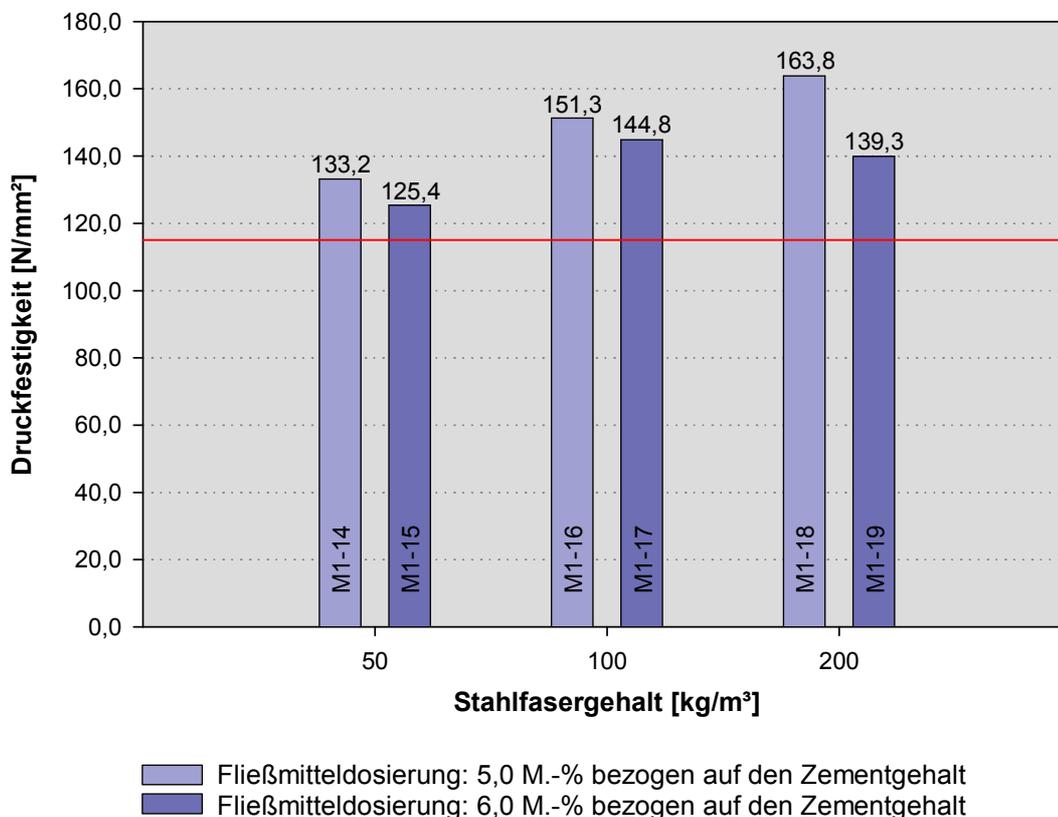


Abbildung 3-27: Kennwerte der Druckfestigkeit UHPC2

Durch die Zugabe der festigkeitssteigernden Stahlfasern liegen die getesteten Mischungen alle über dem Grenzwert für ultrahochfeste Betone von 115 N/mm².

Die Festigkeiten der Mischungen mit einem Fließmittelgehalt von 6,0 M.-% liegen um 4,3 bis 14,9 % unter den Werten der Mischungen mit einer geringeren Fließmitteldosierung. Auffällig ist vor allem die große Festigkeitsdifferenz bei den Mischungen M1-18 und M1-19 mit einem Stahlfasergehalt von 200 kg/m³.

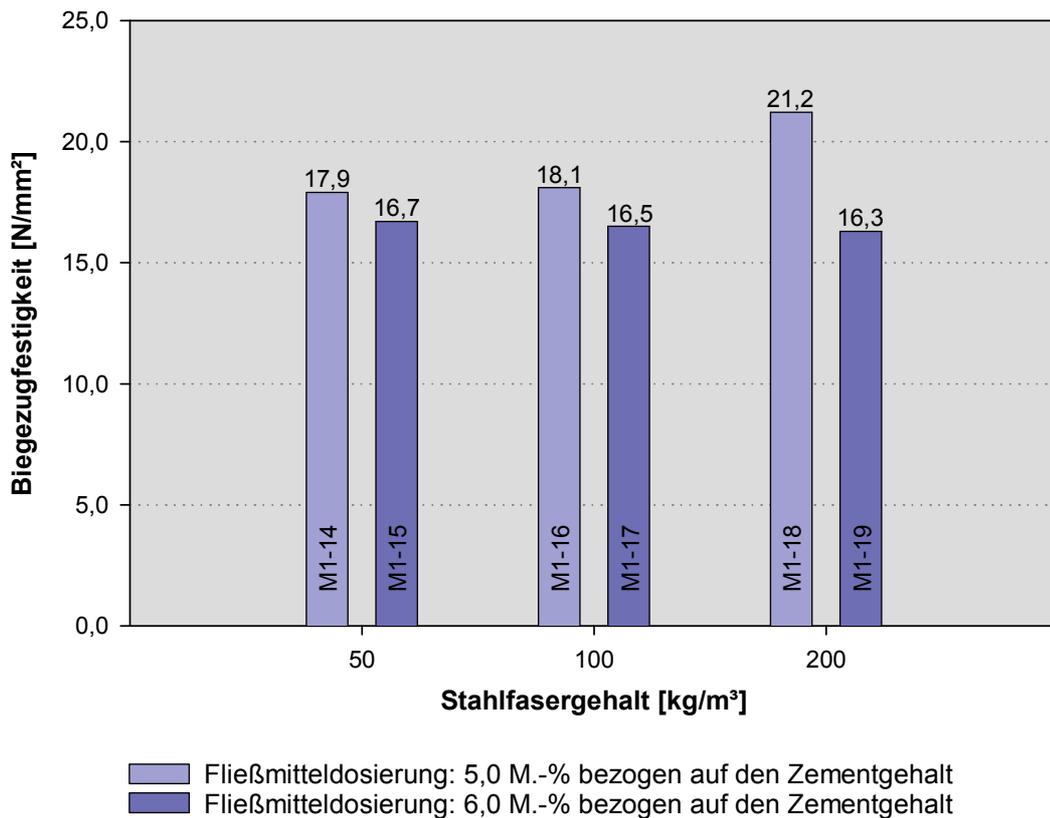


Abbildung 3-28: Kennwerte der Biegezugfestigkeit UHPC2

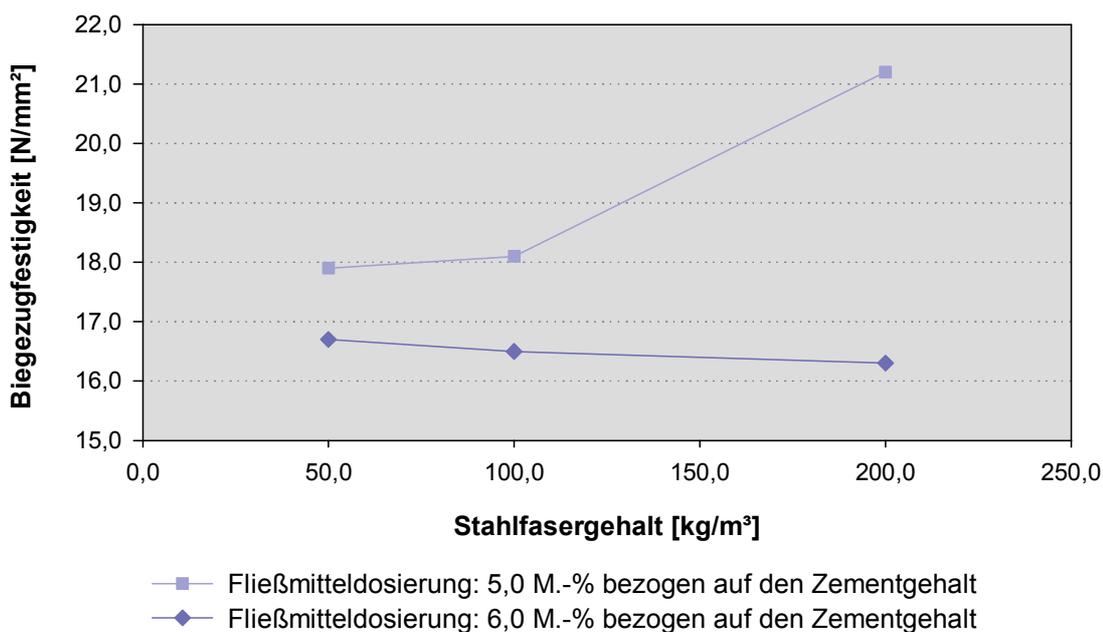


Abbildung 3-29: Verlauf der Biegezugfestigkeit UHPC2

3.4.3.3 Druck- und Biegezugfestigkeit - HPC

Tabelle 3-12: Festigkeitskennwerte HPC

Probennummer	Abmessungen		Biegezugprüfung				Druckprüfung			
	d ₁	d ₂	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.
	[mm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]	
M4-01/1	40,5	40,0	5.261,06	12,18	2,45	-	276,95	110,78	4,51	-
							270,71	108,28	2,15	-
M4-01/2	40,2	40,0	5.601,41	13,06	4,64	-	262,76	105,10	0,85	-
							262,31	104,92	1,02	-
M4-01/3	40,8	39,9	5.287,93	12,21	2,18	-	253,17	101,27	4,47	-
							264,15	105,66	0,32	-
			f_{ctm}	12,48			f_{cm}	106,00		
M4-02/1	40,1	40,0	5.081,24	11,88	7,04	-	245,23	98,09	5,57	-
							266,14	106,46	2,48	-
M4-02/2	40,9	39,9	4.536,57	10,45	5,83	-	264,47	105,79	1,84	-
							250,30	100,12	3,62	-
M4-02/3	40,8	40,0	4.771,28	10,96	1,21	-	256,85	102,74	1,10	-
							275,19	110,08	5,97	-
			f_{ctm}	11,10			f_{cm}	103,88		
M4-03/1	40,7	40,0	4.593,06	10,58	1,86	-	265,19	106,08	0,20	-
							266,43	106,57	0,26	-
M4-03/2	40,4	40,0	4.417,43	10,25	4,91	-	271,95	108,78	2,34	-
							264,07	105,63	0,63	-
M4-03/3	39,9	39,9	4.874,41	11,51	6,77	-	262,09	104,84	1,37	-
							264,66	105,86	0,40	-
			f_{ctm}	10,78			f_{cm}	106,29		
M4-04/1	41,7	40,0	5.610,94	12,61	0,39	-	272,35	108,94	0,89	-
							243,17	97,27	9,92	4b
M4-04/2	42,2	40,0	5.781,08	12,84	1,41	-	279,01	111,60	3,36	-
							268,89	107,56	0,39	-
M4-04/3	42,0	39,9	5.587,66	12,54	1,02	-	258,97	103,59	4,06	4ab
							270,46	108,18	0,19	-
			f_{ctm}	12,66			f_{cm}	107,97		
M4-05/1	41,6	40,0	6.103,44	13,75	7,00	-	267,31	106,92	1,13	4a
							241,86	96,74	8,50	4ab
M4-05/2	40,8	40,0	5.516,02	12,67	1,40	-	273,65	109,46	3,52	-
							276,27	110,51	4,52	-
M4-05/3	40,7	39,9	5.242,01	12,14	5,60	-	181,20	72,48	31,45	-
							262,58	105,03	0,66	-
			f_{ctm}	12,85			f_{cm}	105,73		
M4-06/1	40,4	40,0	5.324,4	12,36	0,86	-	259,47	103,79	0,68	-
							265,49	106,20	1,63	-
M4-06/2	40,5	40,0	5.365,59	12,42	0,34	-	257,42	102,97	1,46	-
							260,60	104,24	0,24	-
M4-06/3	40,4	39,9	5.408,57	12,61	1,21	-	261,92	104,77	0,26	-
							262,50	105,00	0,48	-
			f_{ctm}	12,46			f_{cm}	104,49		

M4-07/1	40,6	40,0	5.122,02	11,83	1,52	-	271,64	108,66	0,33	-
							262,93	105,17	3,52	-
M4-07/2	40,1	40,0	5.021,73	11,74	0,78	-	278,50	111,40	2,19	-
							278,04	111,22	2,02	-
M4-07/3	40,1	40,1	4.892,78	11,38	2,30	-	269,10	107,64	1,26	-
							274,96	109,98	0,89	-
			f_{ctm}	11,65			f_{cm}	109,01		
M4-08/1	41,0	39,9	5.639,60	12,96	0,28	-	283,06	113,22	2,15	4ab
							269,75	107,90	6,75	4a
M4-08/2	41,8	40,0	5.259,92	11,80	9,23	-	298,49	119,40	3,19	4ab
							300,04	120,02	3,72	4a
M4-08/3	41,1	40,0	6.239,55	14,23	9,51	-	282,02	112,81	2,51	4ab
							302,27	120,91	4,49	4ab
			f_{ctm}	13,00			f_{cm}	115,71		
M4-09/1	40,1	39,9	5.698,7	13,39	4,81	-	292,39	116,96	0,64	-
							284,59	113,84	2,04	-
M4-09/2	40,2	40,0	5.238,43	12,22	4,38	-	287,11	114,84	1,17	-
							298,47	119,39	2,74	-
M4-09/3	40,3	39,8	5.413,94	12,72	0,43	-	291,05	116,42	0,18	-
							289,50	115,80	0,35	-
			f_{ctm}	12,78			f_{cm}	116,21		

Die Festigkeitskennwerte der hochfesten Mischungen sind in Abbildung 3-30 und Abbildung 3-31 graphisch gegenübergestellt.

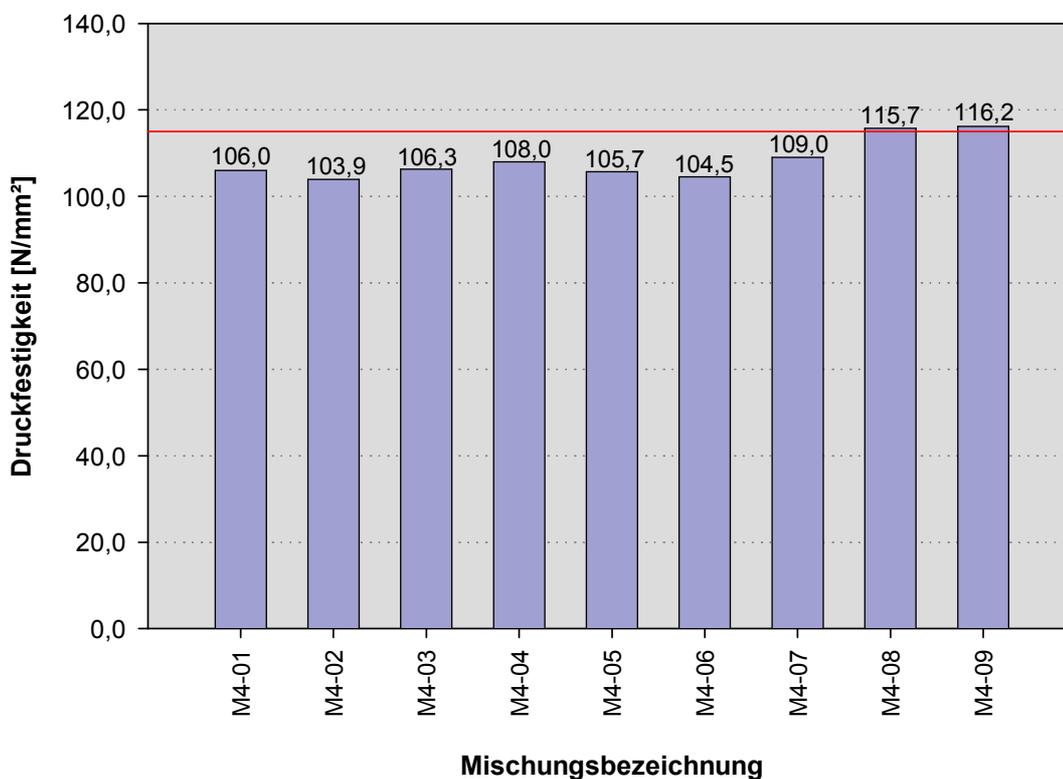


Abbildung 3-30: Kennwerte der Druckfestigkeit HPC

Auffallend sind die hohen Druckfestigkeiten der Mischungen M4-08 und M4-09 von über 115 N/mm^2 . Grund für die höheren Festigkeiten ist der erhöhte Mikrosilikagehalt von 90 kg/m^3 im Vergleich zu 45 kg/m^3 bei den übrigen Mischungen. Die Verdoppelung der Menge an puzzolanischem Silikastaub (vgl. Kapitel 2.2.1.4 und 2.3.1.4) bewirkt eine Festigkeitssteigerung von annähernd 10% gegenüber den anderen Mischungen.

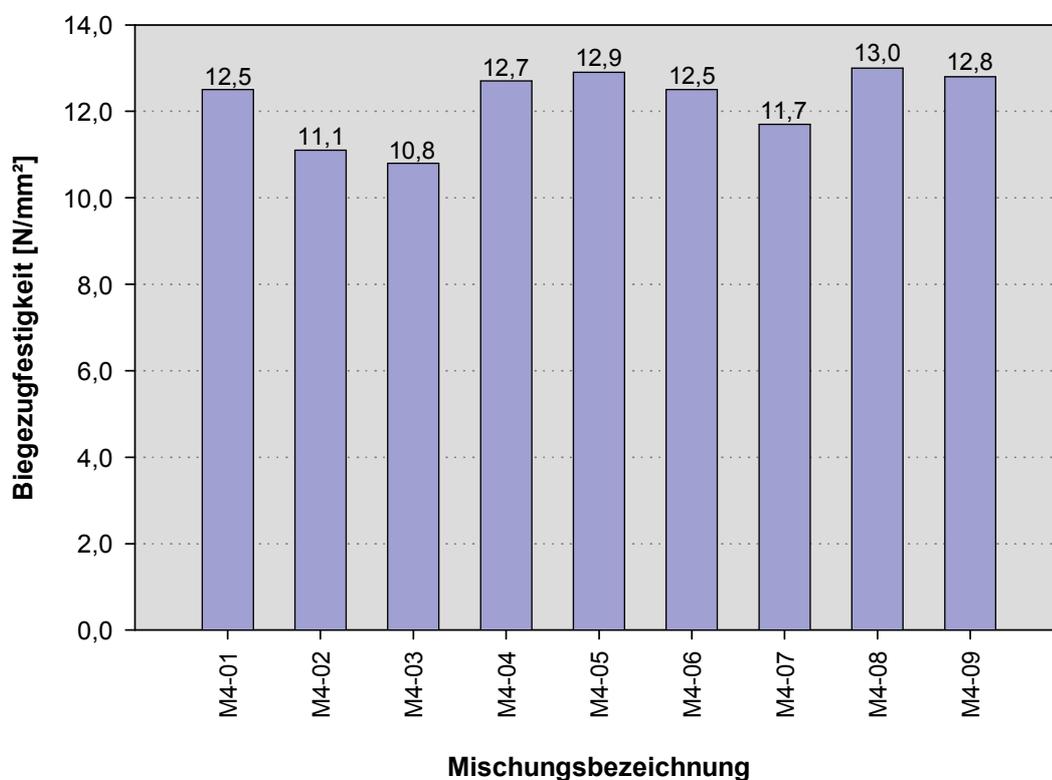


Abbildung 3-31: Kennwerte der Biegezugfestigkeit HPC

3.4.3.4 Bruchverhalten

Die folgenden Abbildungen zeigen das unterschiedliche Bruchverhalten der ultrahochfesten Betone mit und ohne Stahlfasern.

Bei faserlosen Betonen führen die hohen Festigkeiten und geringen Zähigkeiten zum schlagartigen, explosiven Versagen.

Durch die Zugabe feiner Drahtfasern wird die Bruchzähigkeit ultrahochfester Betone deutlich erhöht. Die in der Bindemittelmatrix eingebetteten Fasern können über Haftverbund die eingetragenen Zugkräfte besser übertragen und wirken dadurch sowohl festigkeits- als auch zähigkeitssteigernd.

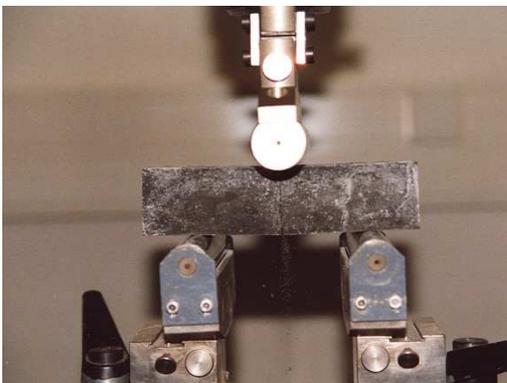


Abbildung 3-32: Bruchbild Biegezugprüfung: links UHPC1, rechts UHPC2



Abbildung 3-33: Bruchbild Druckfestigkeitsprüfung: links UHPC1, rechts UHPC2

3.4.4 Mischungsauswahl

Aus den neunzehn ultrahochfesten und den neun hochfesten Rezepturen wurden basierend auf den Erkenntnissen aus den Vorversuchen drei Mischungen ausgewählt.

Beurteilungskriterien waren in der Reihenfolge ihrer Wertigkeiten:

1. Fließmaß

Mindestens 30 cm für UHPC-Mischungen,
mindestens 28 cm für HPC-Mischungen

2. Entmischung

Keine bis maximal leichte Entmischungserscheinungen

3. Druckfestigkeit

Allgemein möglichst hohe Festigkeiten, jedoch mindestens 115 N/mm² bei den ultrahochfesten Betonen

Eine erste Vorselektion ergab die in Tabelle 3-13 angeführten sechs möglichen Mischungen.

Tabelle 3-13: Vorselektion relevanter Mischungen

Bezeichnung		Fließmaß	Entmischen	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		d [cm]		f_{ctm} [N/mm ²]	f_{cm} [N/mm ²]
UHPC1	M1-08	31,1	AS, leicht	17,7	114,5
	M1-09	31,4	AS, leicht	15,1	122,2
UHPC2	M1-16	30,7	AS, leicht	18,1	151,3
	M1-18	30,1	AS, leicht	21,2	163,8
HPC	M4-08	27,9	nein	13,0	115,7
	M4-09	28,8	nein	12,8	116,2
Legende		AS	Auschwimmen Silikastaub		
		AZ	Absetzen Zuschlag		

Bei der Auswahl einer Mischung für UHPC ohne Stahlfasern (UHPC1) wurde der Mischung M1-09 der Vorzug gegeben, da sie sich durch ein größeres Fließmaß und eine höhere Druckfestigkeit auszeichnet als Mischung M1-08.

Für den UHPC mit Stahlfasern (UHPC2) fiel die Wahl auf Mischung M1-18, da sie die mit Abstand höchsten Druck- und Biegezugfestigkeiten aller getesteten Rezepturen aufweist. Das größere Fließmaß der Mischung M1-16 wurde zugunsten höherer Festigkeiten vernachlässigt.

Als Grundrezeptur für die HPC Probekörper wurde Mischung M4-09 ausgewählt. Obwohl Mischung M4-08 ähnlich gute Festigkeitswerte aufweist, wurde sie wegen des geringeren Fließmaßes und einer inhomogeneren Zusammensetzung, die sich durch verstärkte Lunkerbildung äußerte, ausgeschieden.

Die letztendlich ausgewählten Mischungen M1-09, M1-18 und M4-09 und ihre relevanten Frisch- und Festbetonkennwerte zeigt Tabelle 3-14. Die zugehörigen Mischungszusammensetzungen sind in Tabelle 3-15 angegeben.

Tabelle 3-14: Ausgewählte Mischungen

UHPC1					
		Gehalt			
		[kg/m³]	[M.-%] von Z		
Zuschlag	ZU	1032,0	147,43		
Zement	Z	700,0	100,00		
Wasser	W	224,0	32,00		
Fließmittel	FM	42,0	6,00		
Stahlfasern	F	0,0	0,00		
Mikrosilika	SF	140,0	20,00		
Quarzmehl	QM	84,0	12,00		
Summe		2.222,0		Bezeichng. aus Vorversuchen	M1-09
W/Z-Wert		0,32		Fließmaß [cm]	31,4
W/B-Wert		0,317		Festbetonrohddichte [kg/m³]	2.331,7
V_w/V_m		0,704		Druckfestigkeit [N/mm²]	122,2
Luftporengehalt [%]		3,55		Biegezugfestigkeit [N/mm²]	15,1
UHPC2					
		Gehalt			
		[kg/m³]	[M.-%] von Z		
Zuschlag	ZU	897,4	128,20		
Zement	Z	700,0	100,00		
Wasser	W	224,0	32,00		
Fließmittel	FM	35,0	5,00		
Stahlfasern	F	200,0	28,57		
Mikrosilika	SF	140,0	20,00		
Quarzmehl	QM	168,0	24,00		
Summe		2.364,4		Bezeichng. aus Vorversuchen	M1-18
W/Z-Wert		0,32		Fließmaß [cm]	30,1
W/B-Wert		0,308		Festbetonrohddichte [kg/m³]	2.492,9
V_w/V_m		0,640		Druckfestigkeit [N/mm²]	163,8
Luftporengehalt [%]		3,15		Biegezugfestigkeit [N/mm²]	21,2
HPC					
		Gehalt			
		[kg/m³]	[M.-%] von Z		
Zuschlag	ZU	1.487,4	330,53		
Zement	Z	450,0	100,00		
Wasser	W	180,0	40,00		
Fließmittel	FM	22,5	5,00		
Stahlfasern	F	0,0	0,00		
Mikrosilika	SF	90,0	20,00		
Quarzmehl	QM	90,0	20,00		
Summe		2.319,9		Bezeichng. aus Vorversuchen	M4-09
W/Z-Wert		0,40		Fließmaß [cm]	28,8
W/B-Wert		0,375		Festbetonrohddichte [kg/m³]	2.369,4
V_w/V_m		0,792		Druckfestigkeit [N/mm²]	116,2
Luftporengehalt [%]		2,05		Biegezugfestigkeit [N/mm²]	12,8

Tabelle 3-15: Mischungszusammensetzungen

UHPC1						
Materialbezeichng:	UHPC ohne Stahlfasern		Datum:	16.09.2003		
hergestellt von:	Jan Girzikowsky		Uhrzeit:	11:30		
Anzahl der Proben:	1 Probe 300×300×50 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]	Mischungsbezeichnung aus Vorversuchen	
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000	M1-09	
Feinsand FS	0/1 mm	1.017,5	2.650	0,384		
Summe	Zuschlag	1.017,5		0,384		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	1.100	0,038	[%] von B	
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.190,0		0,581	0,317	
Luftporen				0,036	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.207,5		1,000	(W/Z)	
					V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	6,00	5,00	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm) [kg/m³]		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Probekörper [dm³]		(1×4,5)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Beaufschlagung [dm³]		10%	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Mischungsvolumen [m³]			
Stahlfasern	0,00	0,00			0,00495	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	5.036,4	5.036,5	100,00	1.017,5	46,09
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	3.465,0	3.465,0	100,00	700,0	31,71
Wasser W	Trinkwasser	1.108,8	1.109,0	100,02	224,0	10,15
Fließmittel FM	Glenium 51	207,9	208,0	100,05	42,0	1,90
Mikrosilika SF	Silicol P	693,0	693,0	100,00	140,0	6,34
Quarzmehl QM		415,8	416,0	100,05	84,0	3,81
Summe		10.926,9	10.927,5		2.207,6	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken mischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	313	315	31,4
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	3,55%		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			

UHPC2						
Materialbeschreibung	UHPC mit Stahlfasern		Datum:	18.09.2003		
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky		Uhrzeit:	11:30		
Anzahl der Proben:	1 Probe 300×300×50 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]	Mischungsbezeichnung aus Vorversuchen	
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000	M1-18	
Feinsand FS	0/1 mm	893,4	2.650	0,337		
Summe	Zuschlag	893,4		0,337		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	35,0	1.100	0,032	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	200,0	7.850	0,025	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.467,0		0,631	W/Z-Wert	
Luftporen				0,032	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.360,4		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm) [kg/m³]		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Probekörper [dm³]		(1×4,5)	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Beaufschlagung [dm³]		10%	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Mischungsvolumen [m³]			
Stahlfasern	2,55	28,57			0,00495	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [g]	Einwaage [g]	tatsächl. Mischung		Masse
Feinsand FS	0/1 mm	4.422,3	4.422,5	[%]	[kg/m³]	[%]
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	3.465,0	3.465,0	100,00	893,4	37,85
Wasser W	Trinkwasser	1.108,8	1.109,0	100,02	700,0	29,65
Fließmittel FM	Glenium 51	173,3	173,5	100,14	224,0	9,49
Mikrosilika SF	Silicol P	693,0	693,0	100,00	35,1	1,48
Quarzmehl QM		831,6	831,5	99,99	140,0	5,93
Stahlfasern	Bekaert 6mm	990,0	990,0	100,00	168,0	7,12
Summe		11.684,0	11.684,5		200,0	8,47
					2.360,5	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken mischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	300	302	30,1
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	3,15%		
6. Stahlfasern untermischen		fast	2 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			10 min			

HPC						
Materialbeschreibung	HPC		Datum:	06.10.2003		
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky		Uhrzeit:	11:30		
Anzahl der Proben:	1 Probe 300×300×50 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Rohdichte	Volumen	Mischungsbezeichnung aus Vorversuchen	
		[kg]	[kg/m³]	[m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	1.487,4	2.650	0,561	M4-09	
Feinsand FS	0/1 mm	0,0	2.650	0,000		
Summe	Zuschlag	1.487,4		0,561		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	180,0	1.000	0,180	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	22,5	1.100	0,020	[%] von B	
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	135,0
Mikrosilika SF	Silicol P	90,0	2.300	0,039	30	162,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	59,4
Quarzmehl QM		90,0	2.650	0,034	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	832,5		0,419	W/Z-Wert	
Luftporen				0,020	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.319,9		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	90,0
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	540,0
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	630,0
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm) [kg/m³]		Z+QM+ZU	630,0
AHWZ	0,00	0,00	Probekörper [dm³]		(1×4,5)	4,50
Quarzmehl QM	20,00	16,67	Beaufschlagung [dm³]		10%	0,45
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Mischungsvolumen [m³]			0,00495
Stahlfasern	0,00	0,00				
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Grobsand GS	0/4 mm	7.362,7	7.362,5	100,00	1.487,4	64,11
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	2.227,5	2.227,5	100,00	450,0	19,40
Wasser W	Trinkwasser	891,0	891,0	100,00	180,0	7,76
Fließmittel FM	Glenium 51	111,4	111,5	100,11	22,5	0,97
Mikrosilika SF	Silicol P	445,5	445,5	100,00	90,0	3,88
Quarzmehl QM		445,5	445,5	100,00	90,0	3,88
Summe		11.483,6	11.483,5		2.319,9	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken mischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	286	289	28,8
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	2,05%		
Gesamtdauer Mischvorgang			10 min			

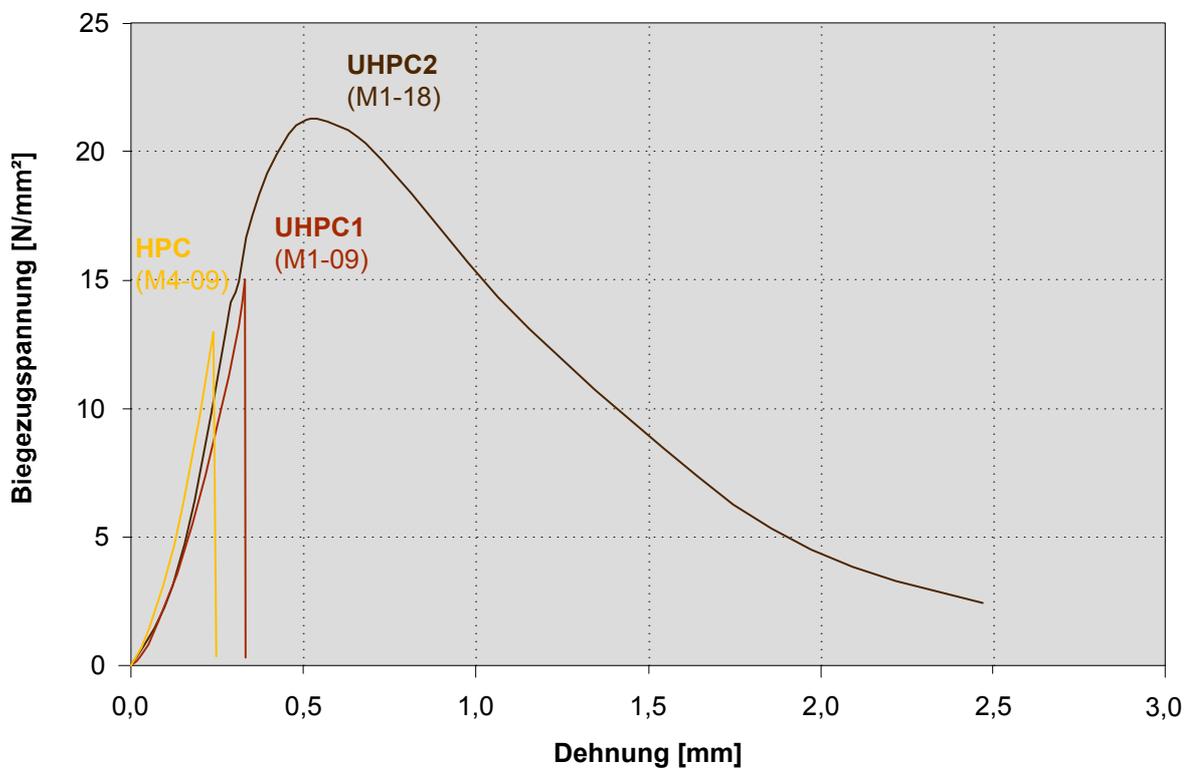
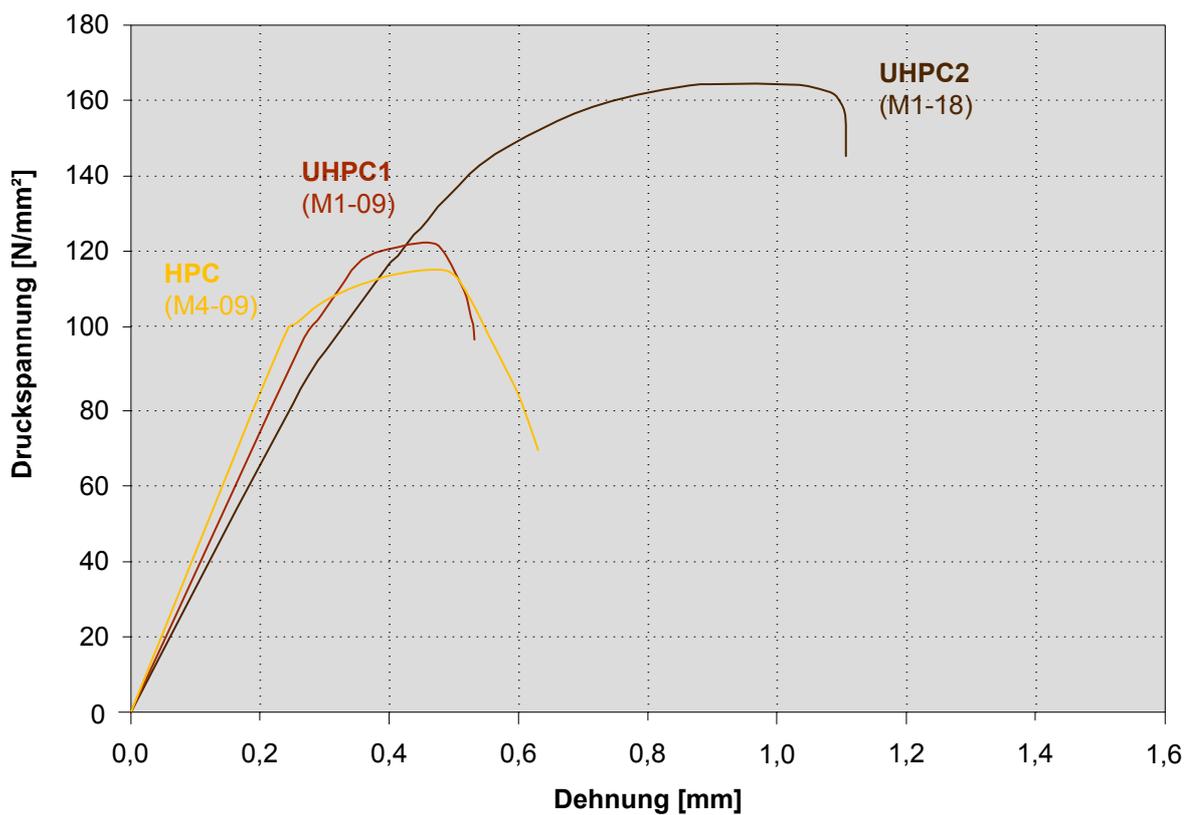


Abbildung 3-34: Spannungs-Dehnungs-Diagramme

4 Hauptversuche

4.1 Versuchsplanung

4.1.1 Vorbemerkungen

Ziel der Hauptversuche war es, die in den Vorversuchen entworfenen Mischungen auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz in textilen Schalungselementen zu untersuchen. Auf Grund der in den Vorversuchen erlangten Erkenntnisse wurden aus den untersuchten Rezepturen zwei UHPC-Mischungen und eine HPC-Mischung ausgewählt, die für den Einsatz in textilen Schalungselementen am geeignetsten erschienen.

4.1.2 Versuche an schrägen Prüfkörpern

Zur Ermittlung der Einsatzfähigkeit wurden Kleinversuchsreihen an schrägen Prüfkörpern unter einer Neigung von 60° durchgeführt, die mit den ausgewählten Feinbetonen befüllt wurden.

Es wurden insgesamt drei Probenkollektive, bestehend aus jeweils einem Probekörper mit Gewebeschalung und einem Referenz-Probekörper mit konventioneller Schalung, hergestellt. Beide Schalungssysteme wiesen die Abmessungen $b \times h \times d = 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ auf.

Tabelle 4-1: Übersicht Probenkollektive

Betonart	Größtkorn	Stahlfasergehalt [kg/m ³]	Anzahl Probekörper	
	[mm]		textile Schalung	konventionelle Schalung
UHPC	1	0	1	1
UHPC	1	200	1	1
HPC	4	0	1	1

Folgende Merkmale wurden untersucht:

- Ausbreitverhalten des Betons im Gewebe
- selbstverdichtendes und selbstnivellierendes Verhalten
- Entmischen beim Einfüllen

- Durchdringung des Deckgewebes
- Ausschalbarkeit (Entfernen des Gewebes)
- Oberflächenbeschaffenheit der ausgeschalteten Probekörper
- Biegezugfestigkeit
- Gefügestruktur

Details zur Versuchsdurchführung finden sich in Kapitel 4.2, die Auswertung erfolgt im daran anschließenden Kapitel 4.3.

4.2 Versuchsdurchführung

4.2.1 Textiles Zweiwandgewebe

Bei dem für die Herstellung der textilen Schalungssysteme eingesetzten Abstandsgewebe handelt es sich um ein von der Firma Girmes In-Text GmbH & Co. KG hergestelltes fadenverbundenes Zweiwandgewebe aus Polyesterfasern. Es besteht aus einer oberen und unteren Decklage, die durch Abstandsfäden miteinander verbunden sind.



Abbildung 4-1: Textiles Zweiwandgewebe: Decklage und Abstandsfäden

Das Textil ist durch die Anordnung und Bindungsart der Polfäden speziell auf Zugbelastung in den Abstandsfäden und größtmögliche Formbarkeit ausgelegt und erfüllt damit alle Anforderungen, die an ein räumliches Schalungssystem zu stellen

sind. Die schlaaffe Verbindung der Decklagen durch weiche Polyesterfäden ermöglicht eine Anpassung des unbefüllten Gewebes an räumlich gekrümmte Formen. Die Formstabilität wird erst erreicht, wenn das Gewebe befüllt ist und der innerhalb der Decklagen wirkende Frischbetondruck die Abstandsfäden aktiviert.

Bei den institutsinternen Untersuchungen wurden die Einflüsse der entwickelten Betonrezepturen sowie des Betonierverfahrens auf das Gewebe verifiziert und die Verwendbarkeit des Abstandsgewebes festgestellt. Auf die detaillierten Ergebnisse der diesbezüglichen Untersuchungen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Von der Herstellerfirma wurden die in Tabelle 4-2 angeführten technischen Angaben übermittelt.

Tabelle 4-2: Technische Daten des Abstandsgewebes

Technische Daten Zweiwandgewebe	
Typenbezeichnung:	5056
Material:	Polyester
Bindungsart der Decklagen:	Leinwandbindung
Abstand zwischen den Decklagen:	50 mm
Einbindung der Abstandsfäden:	Polschlinge
Anzahl der Abstandsfäden:	28.000 Fäden/m ²
Abstand der Abstandsfäden in Kettrichtung:	10 mm
Abstand der Abstandsfäden in Schussrichtung:	5 mm
Durchmesser der Abstandsfäden:	1.100 dtex
Reißfestigkeit der Abstandsfäden:	35 N
Max. Festigkeit gegen Innendruck:	0,4 N/mm ²

4.2.2 Schalungssysteme

Für die Hauptversuchsreihen wurden drei Schalungskollektive, bestehend aus jeweils einem konventionellen und einem textilen Schalungssystem, hergestellt.

Beide Systeme weisen identische Innenabmessungen sowie den gleichen Neigungswinkel auf.

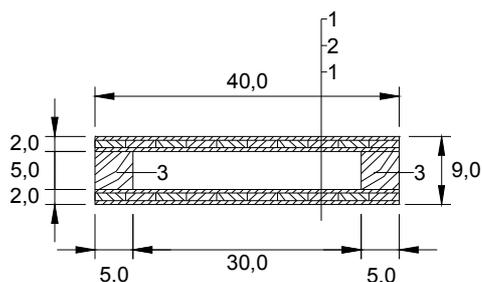


Abbildung 4-2: Schalungskollektive

4.2.2.1 Konventionelles Schalungssystem

Die Holzschalung mit den Innenabmessungen 300 mm × 300 mm × 50 mm besteht aus 20 mm dicken Schalungsplatten, die durch Staffelhölzer miteinander verbunden sind und in einem Winkel von 60° gegen die Horizontale geneigt sind.

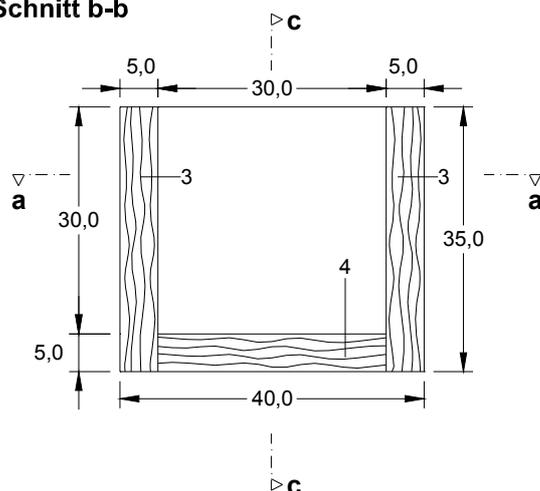
Schnitt a-a



Legende

- 1 Schalungsplatte 400×350×20 mm
- 2 Luftraum
- 3 Staffelholz 50×50×350 mm
- 4 Staffelholz 50×50×300 mm

Schnitt b-b



Schnitt c-c

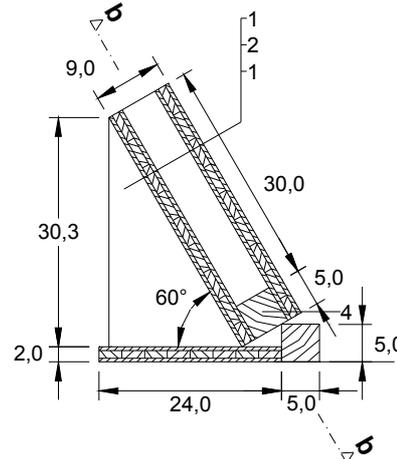
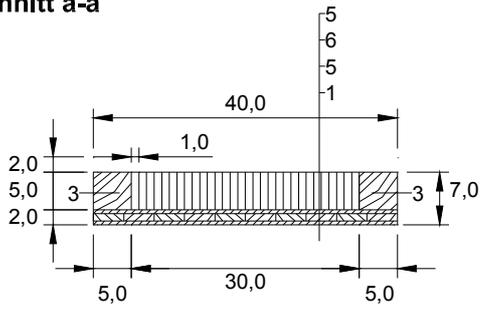


Abbildung 4-3: Systemskizze konventionelles Schalungssystem

4.2.2.2 Textiles Schalungssystem

Die Innenabmessungen sowie der Neigungswinkel der unteren Schalungsplatte entsprechen denen des konventionellen Systems. Die obere Schalungsplatte wird durch das Zweiwandgewebe ersetzt, das an der unteren Platte sowie den seitlichen Staffelhölzern befestigt ist. Der Abstand der Polfäden in Einfüllrichtung beträgt 5 mm, in Querrichtung 10 mm.

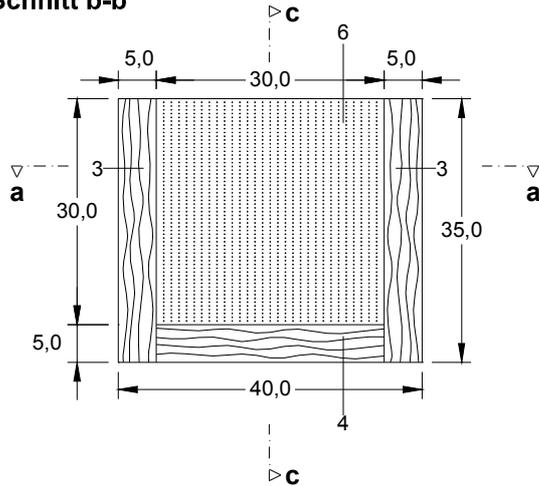
Schnitt a-a



Legende

- 1 Schalungsplatte 400×350×20 mm
- 3 Staffelh Holz 50×50×350 mm
- 4 Staffelh Holz 50×50×300 mm
- 5 Decklage, Gewebe Typ 5056
- 6 Abstandsfäden, 110 tex

Schnitt b-b



Schnitt c-c

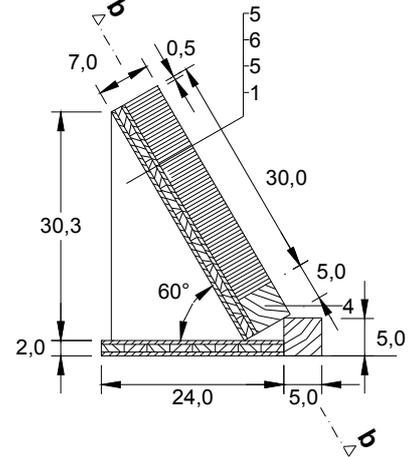


Abbildung 4-4: Systemskizze textiles Schalungssystem



Abbildung 4-5: Textiles Schalungssystem



Abbildung 4-6: Detailansicht Textiles Schalungssystem

4.2.3 Herstellung Probekörper

Es wurde jeweils ein textiles und ein konventionelles Schalungssystem mit den ausgewählten Mischungen befüllt.

Die konventionellen Schalungskörper wurden mit herkömmlichem Schalungsöl vorbehandelt. Bei den textilen Schalungskörpern wurde die obere Decklage des Abstandsgewebes mit Leitungswasser befeuchtet.

Tabelle 4-3: Übersicht Probekörper

Bezeichnung	Betonart	Mischung	Schalungsart	Vorbehandlung
UHPC1-T	UHPC ohne Stahlfasern	M1-09	textil	feucht
UHPC1-K			konventionell	Schalungsöl
UHPC2-T	UHPC mit Stahlfasern	M1-18	textil	feucht
UHPC2-K			konventionell	Schalungsöl
HPC-T	HPC	M4-09	textil	feucht
HPC-K			konventionell	Schalungsöl

Der Einfüllvorgang erfolgte manuell und ohne Aufbringen von Verdichtungsenergie.

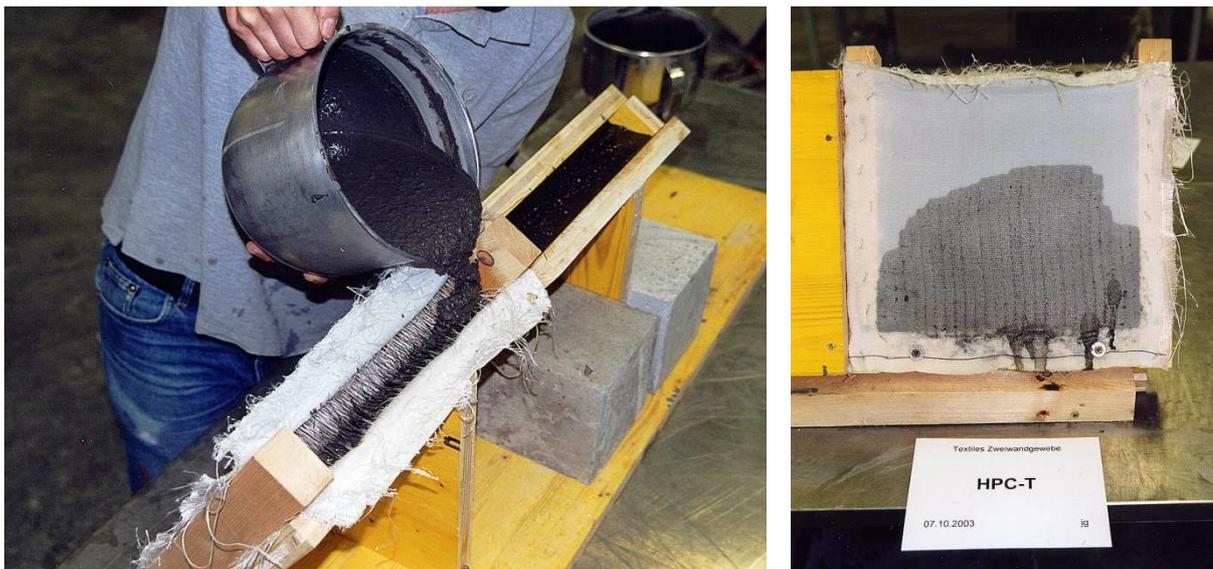


Abbildung 4-7: Befüllung des Zweiwandgewebes

4.2.4 Nachbehandlung

Nach der Befüllung wurden die Probekörper für 24 Stunden in der Schalung belassen und bei Norm-Raumklima gelagert. Anschließend wurde die Schalung entfernt und die Qualität der Proben augenscheinlich beurteilt. Das Ausschalen der textilen Probekörper erfolgte durch händisches Ablösen der Gewebelagen.

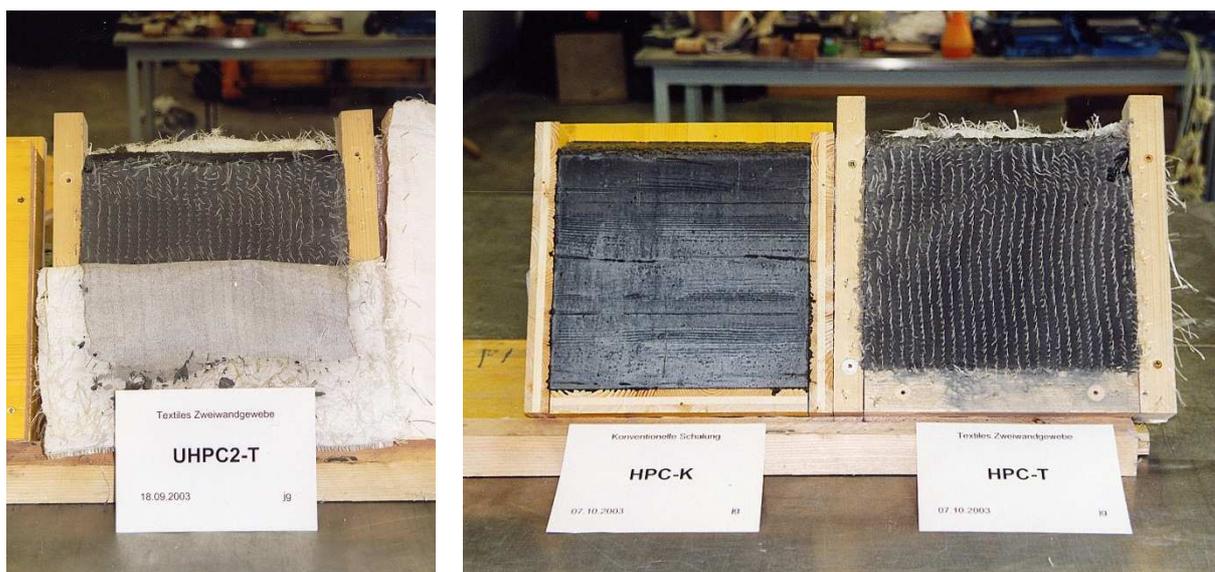


Abbildung 4-8: Ausgeschaltete Probekörper

Die ausgeschalteten Probekörper wurden anschließend bis zur Festigkeitsprüfung im Wasserbad gelagert.

4.2.5 Festbetonprüfung

Die 28 Tage alten Proben wurden einem Dreipunkt-Biegezugversuch unterzogen. Es wurde das Verformungsverhalten sowie die Biegezugfestigkeit ermittelt.

Die Prüfung erfolgte mit der bereits in Kapitel 3.3.5.1 beschriebenen Prüfmaschine. Der Lastangriff erfolgte mittig bei einer Auflagerstützweite von 200 mm. Die Prüfung wurde kraftgesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,06 N/mm²s durchgeführt.

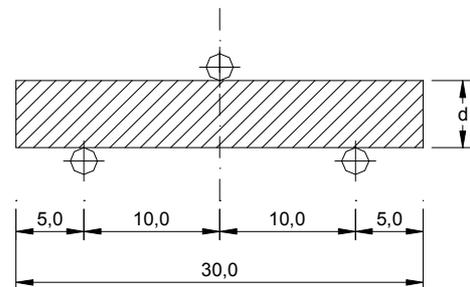
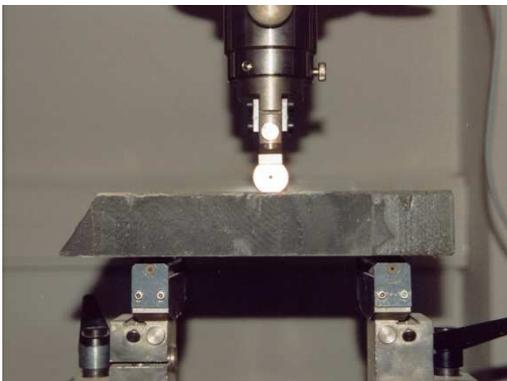


Abbildung 4-9: Prüfungsanordnung beim Dreipunkt-Biegezugversuch

Die maximale Biegezugspannung für den Bruchzustand σ_{\max} wurde mit Gleichung 4-1 ermittelt.

$$\sigma_{\max} = 1,5 \cdot \frac{F_{\max} \cdot l_0}{b \cdot d^2}$$

F_{\max} mittig aufgebrachte Bruchlast [N]

l_0 Auflagerstützweite [mm]

b Breite des Prüfkörpers [mm]

d Höhe des Prüfkörpers [mm]

Gleichung 4-1: Biegezugfestigkeit

Die gemessenen Biegezugspannungen sind in Kapitel 4.3.4 angegeben.

4.3 Auswertung

4.3.1 Befüllbarkeit des textilen Schalungssystems

(1) Ausbreitverhalten des Betons im Zweiwandgewebe

Alle drei Betonmischungen wiesen eine ausreichend hohe Fließfähigkeit auf, um sowohl die konventionellen als auch die textilen Schalungen lediglich unter Wirkung der Schwerkraft vollständig auszufüllen.

Die feinkörnigen UHPC-Mischungen zeigten ein gering viskoses Verhalten und breiteten sich am schnellsten im Schalungsgewebe aus. Durch den in Kapitel 3.4.1.1 beschriebenen Effekt der verbesserten Einbettung kurzer Stahlfasern in feinkörnigem Zuschlag, konnte keine nennenswerte Erhöhung der Viskosität durch die Beigabe von Stahlfasern festgestellt werden.

Bei der grobkörnigeren HPC-Mischung dauerte der Einfüllvorgang deutlich länger, der Grobsand-Zuschlag erhöht die innere Reibung des Frischbetons und bewirkt dadurch eine höhere Viskosität und längere Einfüllzeiten.

Da für die Entwicklung geeigneter Verfahrenstechniken neben der Fließfähigkeit auch die Viskosität und die davon abhängigen Einfüllzeiten von großer Bedeutung sind, sollte in weiterführenden Untersuchungen eine genauere Beurteilung der Viskosität durch Erfassung der Fließzeiten mittels Trichterauslaufzeit-Versuch (V-Funnel-Test), Orimet-Versuch oder vergleichbaren Prüfverfahren für selbstverdichtende Betone erfolgen.

(2) Selbstverdichtendes Verhalten

Die Feinbetone wiesen das angestrebte selbstverdichtende und selbstnivellierende Verhalten auf.

Beim Mischen und Einbringen in die Schalung zugeführte Luft wurde in ausreichendem Maße von selbst wieder abgegeben, sodass verdichtende Maßnahmen wie Rütteln oder Stochern nicht erforderlich waren. Ein langsamer und kontinuierlicher Einfüllvorgang sowie ein ausreichend langer Fließweg begünstigten die Selbstentlüftung während des Einbringens.

Nach vollendetem Fließvorgang bildete sich selbständig ein gleichmäßiges Oberflächenniveau aus.

(3) Entmischen

Trotz des geringen Abstandes der Polfäden im Zweiwandgewebe von 5 mm in Einfüllrichtung und 10 mm in Querrichtung, kam es weder bei den UHPC-Mischungen mit Größtkorn 1 mm noch bei der HPC-Mischung mit Größtkorn 4 mm zum Ablagern oder Blockieren des Zuschlags beim Umfließen der Abstandsfäden. Selbst die ultrahochfeste Mischung mit 6 mm langen Stahlfasern (UHPC2) wies ein hinreichend viskoses Verhalten und hohes Leimvolumen auf, um die kurzen Fasern in der Frischbetonmatrix ausreichend zu dispergieren und eine Kumulierung an den Polfäden zu verhindern. Eine Beeinträchtigung der Gefügestabilität durch den Einfüllvorgang oder das Gewebe ist somit nicht gegeben.

Die bereits in den Vorversuchen festgestellten, vernachlässigbar geringen Entmischungerscheinungen (Aufschwimmen feinsten Silikastaubpartikel, vgl. Kapitel 3.4.2) sind hauptsächlich dem hohen Fließmittelgehalt zuzuschreiben und werden vom Textil nicht beeinflusst.

(4) Durchdringung des Deckgewebes

Eine Penetration des Deckgewebes wurde bei keiner der Proben beobachtet.

(5) Formstabilität der oberen Decklage

Lokale Abweichungen von der Sollform (Beulen, etc.) konnten nicht festgestellt werden.

Die schlaff zwischen den Deckgeweben verlaufenden Abstandsfäden wurden durch den einwirkenden Frischbetondruck aktiviert und konnten die gewünschte Parallelität der Schalungshäute gewährleisten. Die Zugbeanspruchung der Fäden lag in einem Bereich, bei dem es nur zu geringfügigen Dehnungen in Fadenlängsrichtung kam, deren Ausmaß an den erhärteten Probekörpern ermittelt wurde (vgl. Kapitel 4.3.3).

Deformationen aufgrund von lokalem Versagen der Abstandsfäden durch Beschädigung des Fasermaterials beim Einfüllen oder durch Überschreiten der Reißfestigkeit traten nicht auf.

4.3.2 Entschalbarkeit

(1) Entfernen des Gewebes

Die Probekörper wiesen schon nach weniger als 24 Stunden eine ausreichende Festigkeit auf, um die obere und untere Decklage zu entfernen.

Nachdem es bei der Herstellung zu keiner Durchdringung des Deckgewebes kam, konnte die mit dem Probekörper nur über die Abstandsfäden verbundene obere Decklage durch Aufreißen der Polschlingen von Hand abgelöst werden. Anschließend wurden die seitlichen Begrenzungshölzer entfernt und der Probekörper von der unteren Schalungsplatte gehoben.

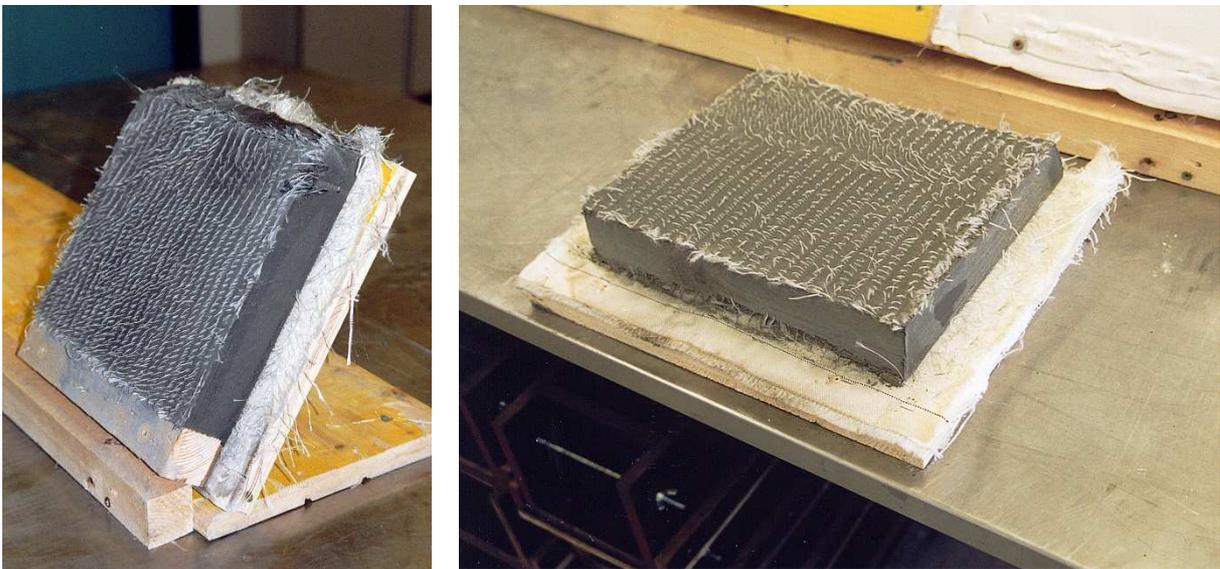


Abbildung 4-10: Teilweise ausgeschaltete Probekörper

Die verbleibende untere Decklage wurde in gleicher Weise abgetrennt. Aus dem Probekörper herausragende Fäden wurden mit einem Bunsenbrenner abgeflämmt.

4.3.3 Beschaffenheit der ausgeschalteten Probekörper

(1) Abweichungen von der Sollform

Um die Maßhaltigkeit zu beurteilen wurden drei repräsentative Querschnittswerte gemessen und die Abweichung von der durch die Abstandsfäden vorgegebenen Solldicke ermittelt.

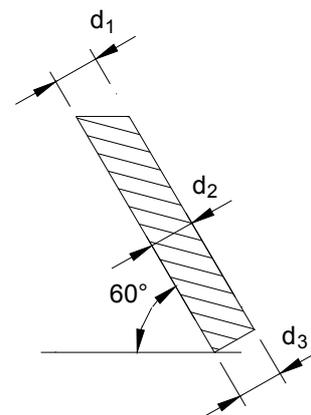
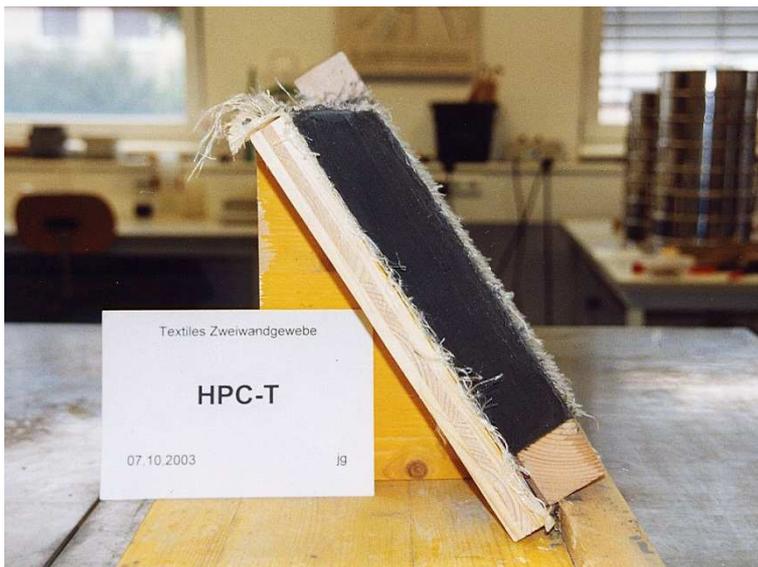


Abbildung 4-11: Ebenmäßigkeit der Probekörper

Tabelle 4-4 zeigt die absoluten und relativen Abweichungen von der Sollform.

Tabelle 4-4: Abweichungen von der Solldicke

Probennummer	d_{soll}	d_1	Abweichung		d_2	Abweichung		d_3	Abweichung	
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]
HPC-T	50,0	48,0	-2,0	-4,00	52,5	2,5	5,00	51,0	1,0	2,00
UHPC1-T	50,0	48,0	-2,0	-4,00	52,0	2,0	4,00	52,0	2,0	4,00
UHPC2-T	50,0	47,0	-3,0	-6,00	51,5	1,5	3,00	51,0	1,0	2,00

In Abbildung 4-12 sind die ermittelten prozentuellen Abweichungen von der Solldicke in Abhängigkeit von der Einfüllhöhe aufgetragen.

Für die Beurteilung der Maßhaltigkeit sind vor allem die Abweichungen in der Mitte des Probekörpers (Einfüllhöhe 15 cm, gemessene Dicke d_2) relevant, da dort alleine die Abstandsfäden für die Einhaltung der Querschnittsgeometrie verantwortlich sind. In diesem Bereich wurde eine maximale Abweichung von 5 % gegenüber der Solldicke festgestellt. Die Abweichungen in dem unteren sowie den seitlichen Randbereichen sind durch die Fixierung der Decklage an den Begrenzungshölzern beeinflusst und liegen unter den im Mittelbereich gemessenen Werten.

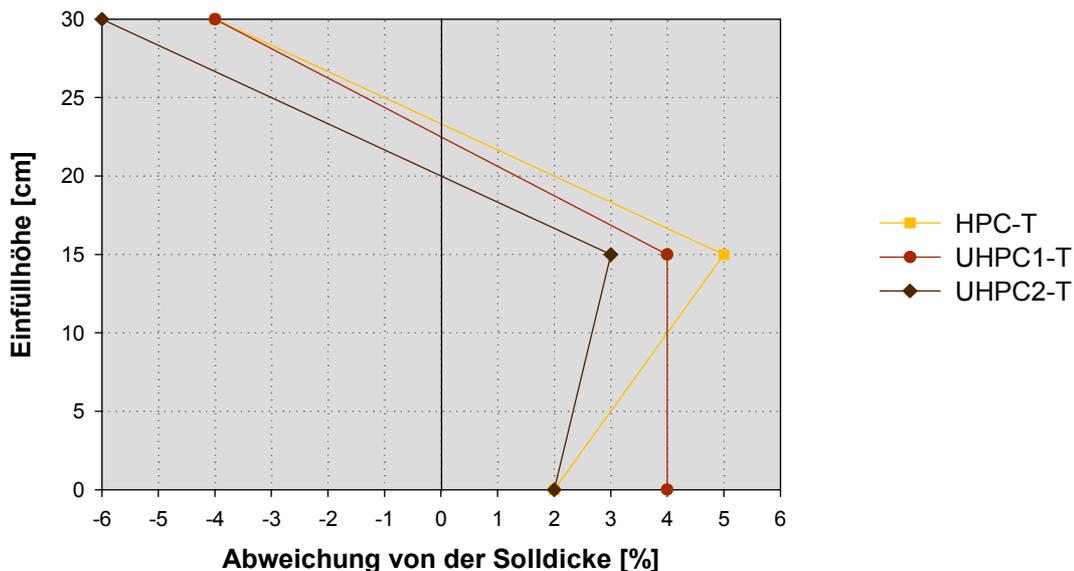


Abbildung 4-12: Prozentuelle Abweichungen in Abhängigkeit von der Einfüllhöhe

(2) Oberflächenbeschaffenheit

An der Oberfläche der konventionell geschalteten Proben sind Luftporen erkennbar, die verstärkt in den unteren Bereichen der Probekörper auftreten. Die aus dem Beton aufsteigende Luft konnte nicht vollständig aus der Schalung entweichen und führte zu einer Lunkerbildung.

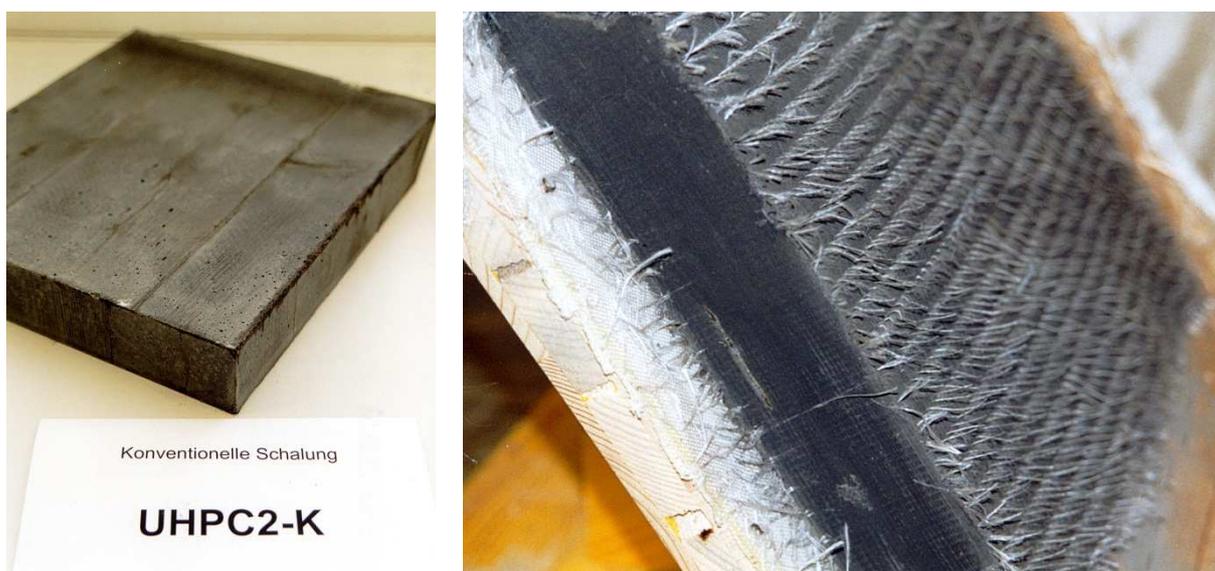


Abbildung 4-13: Oberflächenbeschaffenheit konventionell (links), textil (rechts)

Bei den textilen Probekörpern konnte keine derartige Luftporenbildung an der Oberfläche beobachtet werden. Die aus dem Frischbeton austretende Luft konnte durch das permeable Deckgewebe entweichen, sodass sich eine lunkerfreie Oberfläche bildete.

4.3.4 Biegezugfestigkeit

Tabelle 4-5 zeigt die im Dreipunkt-Biegezugversuch ermittelten maximalen Biegezugspannungen.

Tabelle 4-5: Maximale Biegezugspannungen

Probennummer	Abmessungen								Biegezugprüfung		
	l_1	l_2	b_1	b_2	d_1	d_2	d_3	d_4	A	F_{max}	σ_{max}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[N/mm ²]
HPC-K	273,0	305,0	282,0	279,0	50,0	50,0	50,0	50,0	14.025,0	32.918,48	14,08
	-		280,5		50,0						
HPC-T	262,0	290,0	299,0	297,0	48,0	51,0	53,0	52,0	15.198,0	29.949,98	11,59
	-		298,0		51,0						
UHPC1-K	271,0	301,0	276,0	280,0	50,0	50,0	50,0	50,0	13.900,0	11.916,97	5,14
	-		278,0		50,0						
UHPC1-T	255,0	288,0	296,0	300,0	48,0	52,0	53,0	51,0	15.198,0	33.922,90	13,13
	-		298,0		51,0						
UHPC2-K	280,0	320,0	282,0	282,0	51,0	51,0	51,0	50,0	14.311,5	40.266,32	16,63
	-		282,0		50,8						
UHPC2-T	255,0	285,0	295,0	297,0	47,0	51,0	52,0	51,0	14.874,0	55.547,47	22,30
	-		296,0		50,3						
Legende									Prüfverfahren		
									Prüfverfahren:	3-Punkt-Biegezugversuch, mittlerer Lastangriff	
									Belastungsgeschw.:	0,06 N/mm ² s	
									Auflagerstützweite:	$l_0 = 200 \text{ mm}$	
Probenbezeichnung	K	Konventionelles Schalungssystem									
	T	Textiles Schalungssystem									

In Abbildung 4-14 sind die in den Hauptversuchen an den 30 cm × 30 cm großen Probekörpern ermittelten Biegezugfestigkeiten und die in den Vorversuchen an den

4 cm × 16 cm großen Prismen mit gleicher Mischungszusammensetzung gemessenen Biegezugfestigkeiten graphisch gegenübergestellt.

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus den Vor- und Hauptversuchen ist nur bedingt möglich, da der bei Prüfkörpern unterschiedlicher Größe auftretende Size Effect nicht genauer verifiziert wurde.

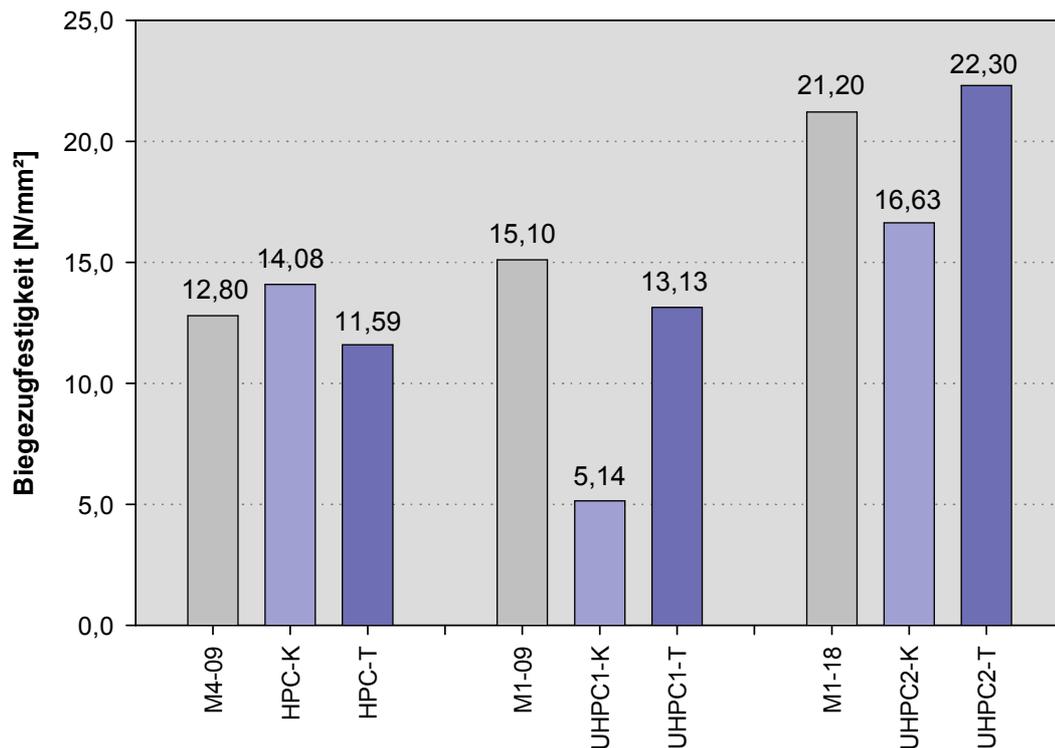


Abbildung 4-14: Biegezugfestigkeit der Probenkollektive

Erläuterung zu Abbildung 4-14:

M4-09, M1-09, M1-18: Prüfprismen 4 cm x 4 cm x 16 cm

HPC-K, UHPC1-K, UHPC2-K: Prüfkörper 30 cm x 30 cm x 5 cm, Konv. Schalung

HPC-T, UHPC1-T, UHPC2-T: Prüfkörper 30 cm x 30 cm x 5 cm, Textilschalung

Es wurde davon ausgegangen, dass die Polfäden des Abstandsgewebes eine Störung des Feinbetongefüges verursachen, die zu einer Verminderung der Biegezugfestigkeit führt.

Dieser Sachverhalt bestätigte sich allerdings nur bei den HPC-Probekörpern. Der textil geschalte Beton erreichte 82,3 % der Biegezugfestigkeit des konventionell geschalteten Betons. Die Verringerung der Biegetragfähigkeit um $2,49 \text{ N/mm}^2$ entspricht einem Festigkeitsverlust von 17,7 %.

Bei den UHPC1-Proben ist eine Aussage über den Einfluss des Gewebes auf die Festigkeit nicht möglich, da der konventionell geschalte Probekörper offensichtlich fehlerhafte Werte lieferte.

Auffallend ist der Unterschied der Biegezugfestigkeiten bei den mit Stahlfasern angereicherten UHPC2-Proben. Die textil geschalte Probe UHPC2-T weist eine um $5,67 \text{ N/mm}^2$ höhere Festigkeit als die konventionelle Probe auf. Das bedeutet eine deutliche Festigkeitssteigerung um 34,1 %.

Aufgrund des zeitlich begrenzten Rahmens dieser Diplomarbeit war eine genauere Untersuchung dieses Sachverhalts nicht möglich. Des Weiteren stand pro Mischung und Schalungssystem jeweils nur ein Probekörper zur Verfügung; Mängel und Ungenauigkeiten bei der Herstellung und Prüfungsdurchführung können nur bei mehreren Ergebnissen ausgeschlossen werden. Eine Verifizierung müsste durch weitere Ergebnisse gestützt werden.

4.3.5 Kurzzeitverformungsverhalten

Das in Abbildung 4-15 dargestellte Verformungsverhalten der Probenkollektive bei Biegezugbelastung entspricht dem bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen üblichen Verhalten.

Eine entscheidende Beeinflussung durch die in den textilen Proben verbleibenden Abstandsfäden war nicht zu erwarten, da sie in der gleichen Richtung wie die aufgebrachte Last in den Probekörpern vorliegen und somit nicht zur Abtragung der Biegezugkräfte beitragen können.

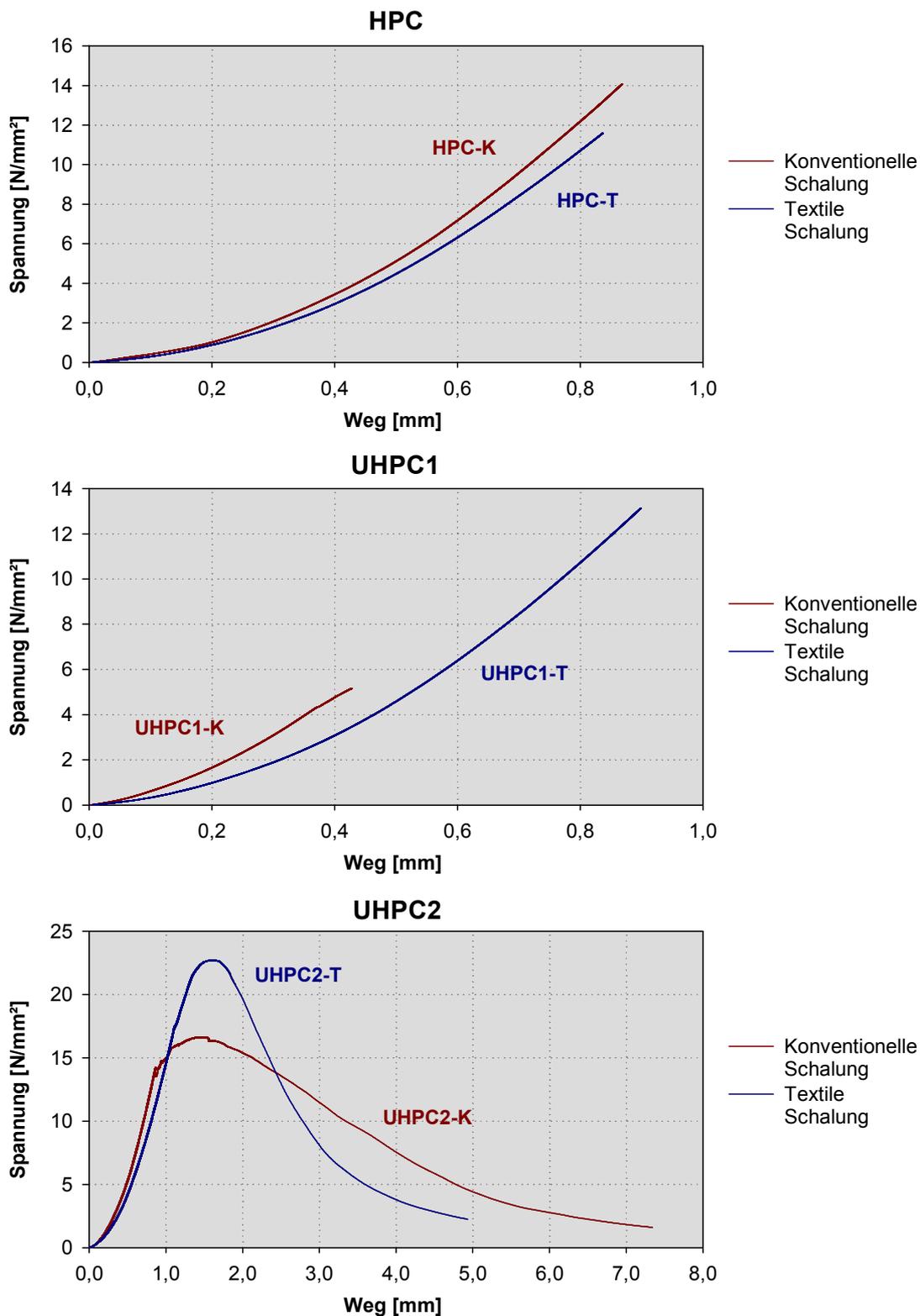


Abbildung 4-15: Spannungs-Dehnungs-Diagramme (Biegezugbeanspruchung)

4.3.6 Bruchverhalten

Die folgenden Abbildungen zeigen die Bruchbilder der Probenkollektive nach der Festigkeitsprüfung.

Die für hochfeste Betone charakteristischen, glatten Spröbruchflächen, die aufgrund der hohen Zementsteinfestigkeiten direkt durch das Zuschlagskorn verlaufen, sind bei allen Prüfkörpern deutlich zu erkennen.



Abbildung 4-16: Bruchbild HPC konventionell (links), textil (rechts)



Abbildung 4-17: Bruchbild UHPC1 konventionell (links), textil (rechts)

Das Bruchbild der UHPC1-K Probe lässt darauf schließen, dass die niedrigen Festigkeitswerte auf eine ungenaue Lagepositionierung des Probekörpers bei der Biegezugprüfung zurückzuführen sind.

4.3.7 Gefügestruktur

Eine erste, augenscheinliche Beurteilung der Gefügestruktur an den Bruchflächen ergab keine außergewöhnlichen Unregelmäßigkeiten in der Zusammensetzung oder Gefügestörungen durch das textile Gewebe.



Abbildung 4-18: Gefügestruktur HPC konventionell (links), textil (rechts)



Abbildung 4-19: Gefügestruktur UHPC1 konventionell (links), textil (rechts)

5 Großversuche

5.1 Versuchsplanung

5.1.1 Vorbemerkungen

In abschließenden Versuchen im Anwendungsmaßstab sollte die Plausibilität der Hauptversuche an größeren Prüfkörpern untersucht sowie die Verfahrenstechnik erprobt werden.

Als tragende Schalfläche wurde eine kreisbogenförmige Betonschalung aus 27 mm dicken Schaltafeln mit einer freien Spannweite von 2,0 m errichtet.

An ihr wurde die Einmalschalung aus Zweiwandgewebe befestigt, mit den entwickelten Feinbetonmischungen befüllt und derart ein ca. 30 cm breites Bogensegment hergestellt.

In abschließenden Messreihen wurde das ausgeschaltete Bogensegment einem Belastungstest unterzogen.

Das durchgeführte Arbeitsprogramm gliederte sich somit in folgende Abschnitte:

(1) Errichtung der tragenden Schalung

Entwurf und Errichtung einer tragenden Schalung für das textile Zweiwandgewebe.

(2) Verifizierung des Maßstabsfaktors

Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Mischergrößen auf die Frischbetonkonsistenz.

(3) Verfahrensentwicklung

Herstellung eines Bogensegments unter Anwendung eines geeigneten Einfüllverfahrens.

(4) Messtechnische Untersuchung des Bogensegments

Belastungstest des ausgeschalteten und vollständig erhärteten Bogensegments.

5.1.2 Errichtung der tragenden Schalung

Die Grundform der tragenden Schalung bildet ein halbkreisförmiger Bogen mit einer Spannweite von 2,0 m und einer Stichhöhe von 1,0 m. Aus herstellungstechnischen und wirtschaftlichen Gründen wurde der kreisrunde Bogen in zehn gleich große Segmente mit einem Öffnungswinkel von jeweils 18° unterteilt und die Bogenform durch ca. 31 cm lange, geradlinige Sehnen polygonal angenähert.

Als Schalungsmaterial kamen konventionelle Dreischichtplatten der Firma Doka mit einer Stärke von 27 mm zum Einsatz.

Die Entwicklung der Grundschalung zu dem angestrebten textilen Schalungssystem sowie erläuternde Skizzen zu der beschriebenen Schalung finden sich in Kapitel 5.2.

5.1.3 Verifizierung des Maßstabsfaktors

Zur Bestimmung des Einflusses veränderter Mischungsbedingungen auf die Frischbetonkonsistenz wurden die im Labormaßstab (Intensivmischer mit einem Fassungsvermögen von 4,5 l) entwickelten Feinbetone in einem Intensivmischer mit einem Fassungsvermögen von 50 l gemischt (siehe auch Kapitel 5.5.1).

5.1.4 Verfahrensentwicklung

Ziel dieses Arbeitsabschnittes war die Erprobung eines praxisgerechten, mit einfachen Mitteln durchzuführenden und leicht zu handhabenden Einfüllverfahrens. Es sah vor, dass der flüssige Frischbeton an der höchsten Stelle des Bogensegments, ohne die Zuhilfenahme von Pumptechnologien, in die textile Schalung eingebracht wird und sich lediglich unter Einwirkung der Schwerkraft in der Schalung ausbreitet, diese zur Gänze ausfüllt und sich weitgehend selbst verdichtet.

5.1.5 Messtechnische Untersuchung des Bogensegments

Das fertiggestellte und vollständig erhärtete Bogensegment wurde abschließend einem Belastungstest unterzogen. Zur Messung der Bruchlast wurde eine Kraftmessdose installiert, die Verformungen des Betonbogens während der Belastungsprüfung wurden mittels Dehnmessstreifen gemessen.

5.2 Textiles Schalungssystem

Da die Betonschale ohne konventionelle Bewehrung ausgeführt werden sollte, wurde die Herstellung eines Bogentragwerks, das die Tragwerkslasten hauptsächlich über Druckkräfte abträgt, als Ausgangsform für die Schalungsgeometrie gewählt.

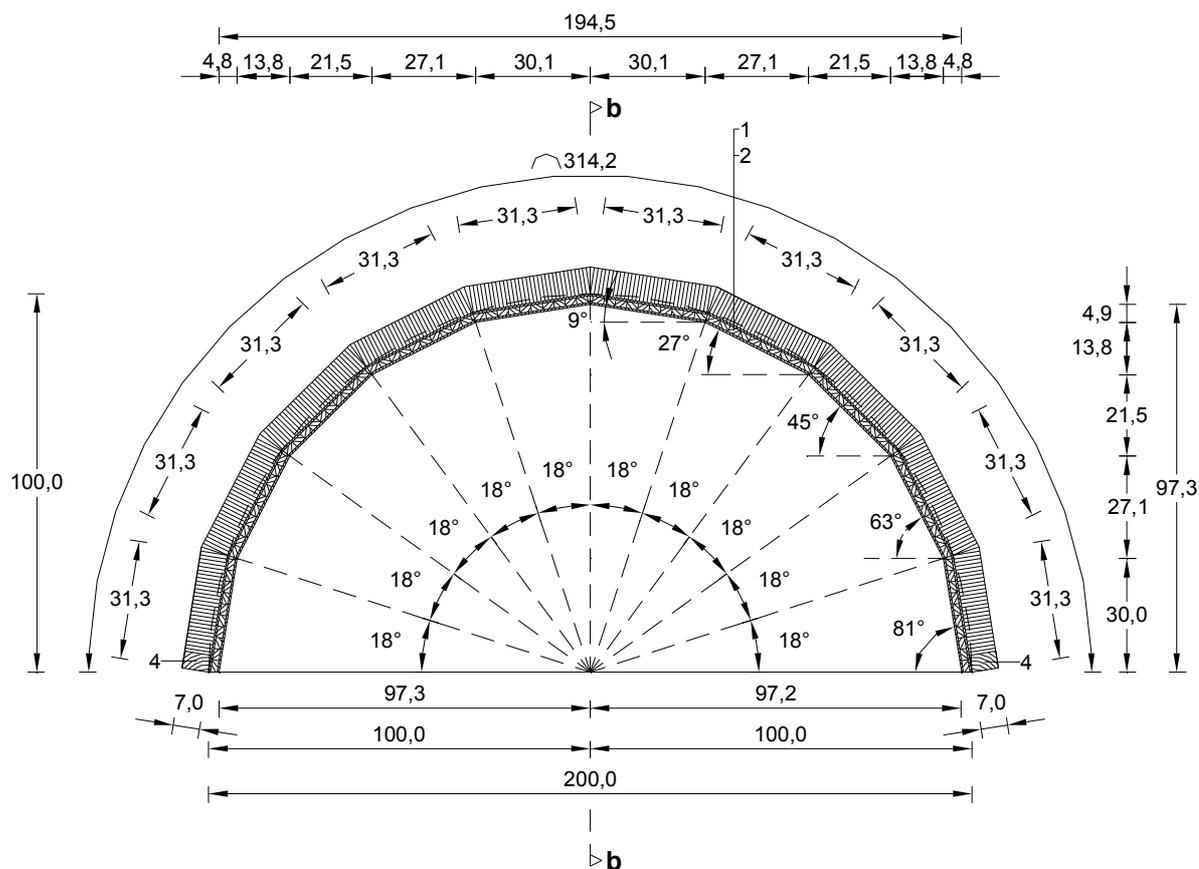
Aus verfahrenstechnischer Sicht wurde die Höhe des Schalungssystems derart gewählt, dass ein Einbringen des Frischbetons von Hand ohne zusätzliche Hilfsmaßnahmen möglich ist. Die Stichhöhe des Bogens wurde daher mit 100 cm festgelegt.

Für das Schalungssystem wurden daher folgende Eckdaten festgelegt:

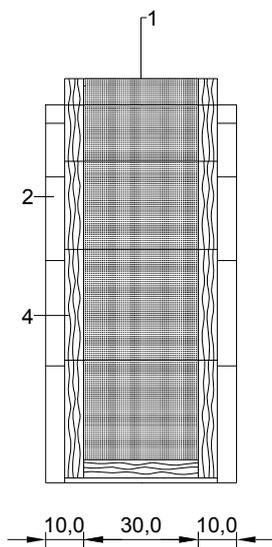
Geometrische Grundform:	Kreisbogensegment
Segmentbreite:	30 cm
Radius Kreisbogen:	100 cm
Stichhöhe:	100 cm
Spannweite am Fußpunkt:	200 cm
Anzahl Flächensegmente:	10
Abmessungen Segmente:	30 cm x 31,3 cm x 2,7 cm
Schaltafeln:	Doka-Dreischichtenplatte 3-SO
Beschreibung:	Dreischichtige Betonschalungsplatte aus Fichte
Oberfläche:	Harnstoff-Melaminharzleim
Abmessungen:	100 cm x 50 cm
Stärke:	27 mm
Eigengewicht:	6,5 kg
Flächengewicht:	0,13 kN/m ²
Schalungsgewicht gesamt:	10 x 6,5 kg = 65 kg

Das in Kapitel 4.2.1 beschriebene textile Zweiwandgewebe wurde auf die tragende Grundschalung aufgebracht und mittels Handtacker mit Klammern an der Schalungsfläche befestigt. Anschließend wurden zur seitlichen Abschaltung des Bogensegments Staffelhölzer aufgeschraubt, die in ihrer Dimension der Länge der Abstandsfäden entsprachen.

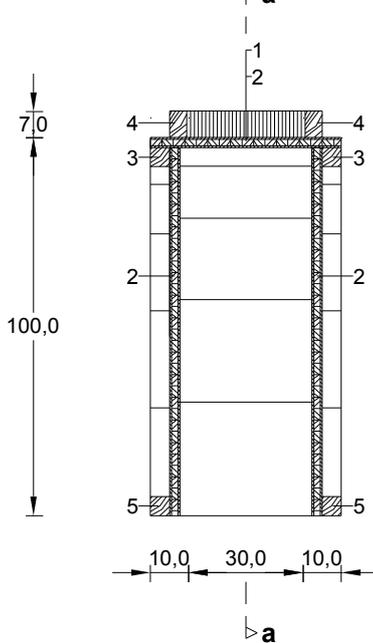
Längsschnitt a-a



Ansicht



Querschnitt b-b



Legende

- 1 Zweiwandgewebe
- 2 Doka Schalungsplatte 27 mm
- 3 Staffelholz 45x45 mm
- 4 Staffelholz 45x75 mm
- 5 Staffelholz 75x75 mm

Abbildung 5-1: Systemskizze textiles Schalungssystem



Abbildung 5-2: Textiles Schalungssystem

Zum Einbringen des Betons wurde am Scheitelpunkt die obere Decklage des Zweiwandgewebes über die gesamte Breite durchtrennt, beidseitig um ca. 10 cm umgeschlagen und an quer zur Längsachse montierten Staffelhölzern befestigt. Derart wurde eine ca. 20 x 30 cm große Einfüllöffnung für das manuelle Einbringen des Frischbetons geschaffen.



Abbildung 5-3: Einfüllöffnung

5.3 Mischungsaufbau

5.3.1 Ausgangsstoffe

5.3.1.1 Zuschlag

Als Zuschlag für den ultrahochfesten Beton wurde Quarzsand ME 31 der Firma Quarzwerke Österreich GmbH mit einer Rohdichte von 2.650 kg/m^3 und einer Körnung von 0,1 - 0,5 mm verwendet. Der Quarzsand wird attritiert, gewaschen, hydroklassiert, gesiebt und von Kalk sowie organischen Verunreinigungen befreit. Durch sein gerundetes Korn und die chemischen Inhaltsstoffe ist er speziell als Formgrundstoff für die Gießereiindustrie geeignet [38].

Tabelle 5-1: Korngrößenverteilung gemäß Produktdatenblatt des Herstellers [38]

Körnung [mm]	Siebrückstand		Siebdurchgang
	Richtwert [%]	Toleranz [%]	Richtwert [%]
0,71		max. 0,5	100
0,5	1,5	max. 3,0	98,5
0,355	26	20...35	72,5
0,25	49	40...60	23,5
0,125	23	18...28	0,5
0,063	0,5	max. 2,0	
<		max. 0,5	

Tabelle 5-2: Sieblinie Zuschlag

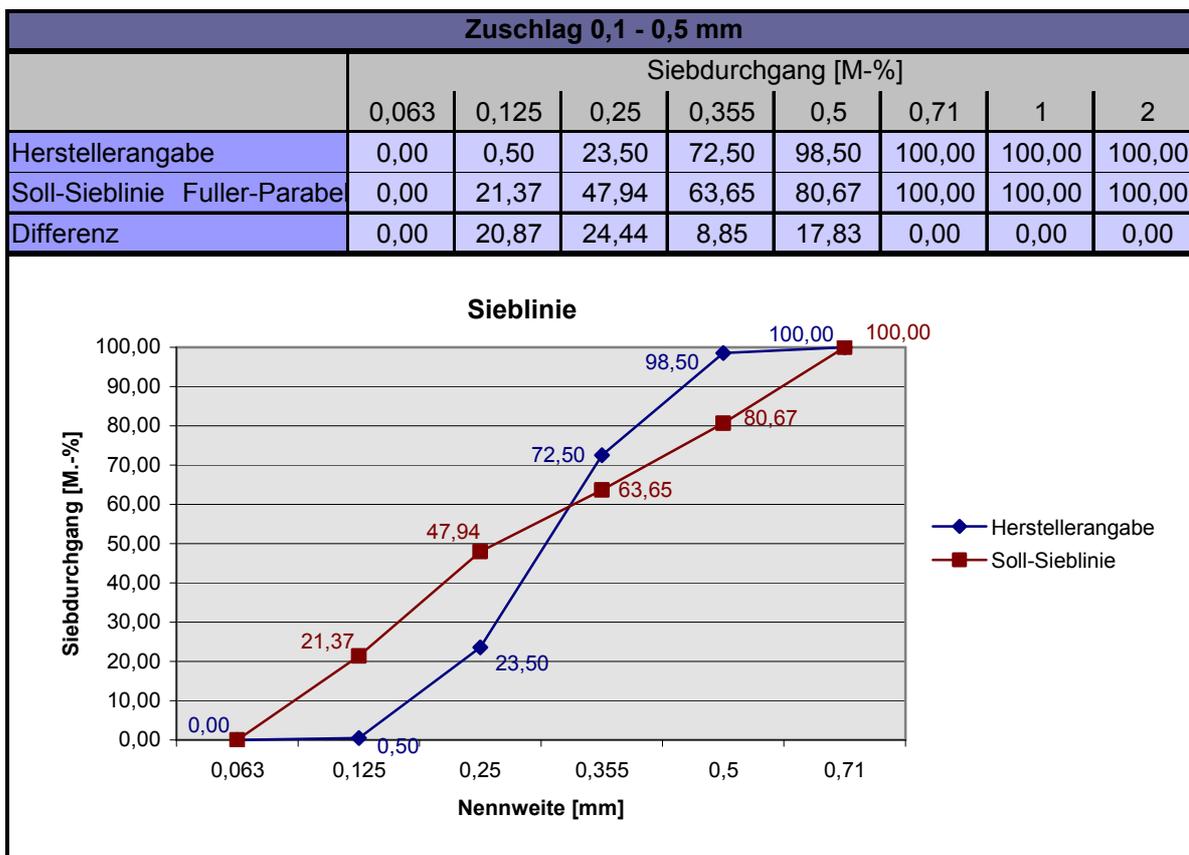


Tabelle 5-3: Chemische Analyse (in Gew.-%) [38]

Element	Richtwert	Toleranz
SiO ₂	97,00	96 ... 98
Al ₂ O ₃	1,70	max. 2,20
Fe ₂ O ₃	0,17	max. 0,25

Tabelle 5-4: Physikalische Eigenschaften [38]

Physikalische Eigenschaften			
Schüttgewicht	1,5 t/m ³	mittlere Korngröße	0,30 mm
Dichte	2,65 t/m ³	AFS-nummer	51
Härte	7 Mohs	Glühverlust	< 0,3 %
Schlammstoffgehalt	< 0,2 %	Sinterbeginn (lt. ÖGI)	~ 1.420° C

5.3.1.2 Mehlkorn

Um den Feinkornanteil der Probemischungen zu erhöhen wurde dem Zuschlagsgemisch Quarzmehl der Firma Quarzwerke Österreich GmbH mit einer Rohdichte von 2.650 kg/m^3 sowie einer Mahlfinheit von $10.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ beigemischt. Das Quarzmehl wird durch eisenfreie Mahlung mit nachfolgender Windsichtung aus aufbereitetem Quarzsand hergestellt [39]. Aufgrund der Feinheit des Mehlkorns wird nicht mehr die Sieblinie, sondern die Mahlfinheit angegeben.

Tabelle 5-5: Trockensiebrückstand, DIN 53734 (in Gew.-%) [39]

Maschenweite [μm]	Mahlfinheit (Blainewert in cm^2/g)							
	1.600	2.500	3.600	4.900	6.400	10.000	10.000/2	16.900
> 160	3							
> 125	7	3						
> 100	14	7	3					
> 90	19	11	5	3				
> 71	28	19	13	10	3			
> 63	32	23	17	14	5	3	1	
> 40	50	40	36	32	21	19	11	2

Tabelle 5-6: Chemische Analyse, DIN 51001 [39]

Element	Gew.-%
SiO_2	97,00
Al_2O_3	1,60
Fe_2O_3	0,03
TiO_2	0,04
CaO + MgO	0,10
Na_2O	0,02
K_2O	1,00
Glühverlust	0,20

5.3.1.3 Mikrosilika

Als puzzolanischer Zusatzstoff wurde Elkem Microsilica Grade 940-U der Firma Elkem ASA, Materials beigegeben. Das unverdichtete Pulver aus amorphem Siliziumdioxid (SiO_2) weist eine Schüttdichte von 200 kg/m^3 bis 350 kg/m^3 und eine durchschnittliche Korngröße von $0,15 \mu\text{m}$ auf. Die einzelnen Körner liegen hauptsächlich in Agglomeraten mit einem Durchmesser von $0,1$ bis $1 \mu\text{m}$ vor [40].

5.3.1.4 Zement

Wegen seiner geringen Wärmeentwicklung, guten Verarbeitbarkeit, des geringen Wasserbedarfs sowie hervorragender Nacherhärtung wurde Contragress Zement der Firma Lafarge Zementwerke GmbH verwendet. Bei der Zementsorte CEM I 42,5 N – SR O WT 27 C₃A-frei gemäß ÖNORM EN 197-1 bzw. ÖNORM B 3327-1, handelt es sich um einen rasch erhärtenden, C₃A-freien, hochsulfatbeständigen Portlandzement, der speziell für die Herstellung von Hochleistungsbeton geeignet ist [41].

Tabelle 5-7: Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung [41]

Eigenschaften	Richtwerte	Normanforderungen	
		ÖNORM EN 197-1	ÖNORM B 3327-1
Dichte	3,16 t/m ³	-	-
Druckfestigkeit			
1 Tag	12 N/mm ²		≥ 6,0
2 Tage	24 N/mm ²	≥ 10,0	
28 Tage	52 N/mm ²	≥ 42,5	
Mahlfeinheit (Blainewert)	3.200 cm ² /g		< 5 % Schwankung
Erstarrungsbeginn (bei 20 °C)	180 min	≥ 60 min	≥ 90 min
Bluten nach 120 min	15 cm ³		< 25 cm ³
Wärmeentwicklung nach 15 h	180 J/g		< 210 J/g

5.3.1.5 Fließmittel

Zur Reduktion des Wasseranspruchs wurde der Mischung der Hochleistungsverflüssiger Glenium ACE 430 (FM) der Firma BASF Construction Polymers GmbH zugefügt. Die auf modifizierten Polycarboxylatethern basierende Flüssigkeit bewirkt, dass für die Hydratationsreaktion der Zementpartikel eine größere Oberfläche zur Verfügung steht. Zusätzlich erfolgt eine sehr rasche Adsorption der Moleküle an den Zementpartikeln und ein außerordentlich effizienter Dispergierungseffekt (elektrostatische Stabilisierung). Die Summe dieser Effekte bewirkt eine frühere Hydratationsreaktion. Die dabei auftretende Wärmeentwicklung wird effizienter ausgenutzt und es resultiert eine deutlich raschere Frühfestigkeitsentwicklung des Betons. Der vom Hersteller empfohlene Dosierbereich liegt zwischen 0,2 M.-% und 3,0 M.-% vom Zementgewicht.

Tabelle 5-8: Technische Daten

Technische Daten	
Rohstoffbasis	Polycarboxylatether
Farbe und Lieferform	hellbraune Flüssigkeit
Dichte (bei 20 °C)	1,06 ± 0,02 g/cm ³
pH-Wert (bei 20 °C) nach Herstellung	5,5 ± 1,0
maximaler Chloridgehalt	0,10 M.-%
maximaler Alkaligehalt	1,5 M.-% als Na ₂ O-Äquivalent

5.3.1.6 Wasser

Es wurde reines Trinkwasser verwendet.

5.3.1.7 Stahlfasern

Für die Herstellung der ultrahochfesten Betonmischungen wurden Stahlfasern der Firma KrampeHarex GmbH & Co. KG mit der Bezeichnung DM 6/0,17 verwendet. Die runden, glatten Fasern weisen eine Länge von 6 mm ($\pm 10\%$) und einen Durchmesser von 0,15 mm bis 0,22 mm (Verhältnis $l/d \approx 33$) auf. Die Zugfestigkeit beträgt mindestens 2.100 N/mm² [42].

5.4 Mischungsentwurf

5.4.1 Vorbemerkungen

Aufbauend auf den in den Hauptversuchen als geeignet verifizierten Mischungen wurde eine für die Durchführung des Großversuchs geeignete Mischung zusammengestellt.

Da zwischen den Hauptversuchen und dem abschließenden Großversuch ein größerer Zeitraum lag, musste die ausgewählte Mischung unter den geänderten Randbedingungen vorerst getestet werden. Neben dem Wechsel der im Labor zur Verfügung stehenden Mischvorrichtungen (vergleiche Kapitel 3.3.1 und 5.5.1) waren auch die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Ausgangsstoffe nicht mehr vorrätig. Mit den in Kapitel 5.3.1 angeführten Ausgangsstoffen wurde die Betonrezeptur solange variiert, bis eine stabile, ausreichend fließfähige Mischung erreicht wurde.

5.4.2 Betonrezeptur

5.4.2.1 Mischungszusammensetzung UHPC VV1

Mischung VV1 zeigte zwar ein sehr gutes Fließmaß von ca. 36 cm. allerdings kam es zu starken Entmischungserscheinungen.

5.4.2.2 Mischungszusammensetzung UHPC VV2

Mischung VV2 war bei einem gemessenen Fließmaß von ca. 33 cm ausreichend stabil.

5.4.2.3 Mischungszusammensetzung UHPC VV2 mit Stahlfasern

Um die Duktilität des Festbetons nach Erhärtung zu erhöhen wurden der zuvor ermittelten Mischung UHPC VV2 zusätzlich Stahlfasern beigemischt.

5.4.2.4 Mischungszusammensetzung UHPC GV

Aufgrund der in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Vorgänge wurde während des Großversuchs der Fließmittelgehalt der Mischung UHPC VV2 mit Stahlfasern verändert.

5.4.2.5 Stoffraumrechnung der Mischungszusammensetzungen

Die Stoffraumrechnungen der zuvor beschriebenen Mischungen werden in Tabelle 5-9 bis Tabelle 5-12 wiedergegeben.

Tabelle 5-9: Mischungszusammensetzung UHPC VV1

UHPC VV1							
Materialbezeichng:	UHPC ohne Stahlfasern		Datum:	28.08.2012			
hergestellt von:	Jan Girzikowsky		Uhrzeit:	10:00			
Anzahl der Proben:	3 Prismen						
Anforderungen							
W/B-Wert		0,28	Fließmittel	[M.-% v. Z]	2,00		
Sand trocken	[dm ³ /m ³]	385,00	Fließmittel	[M.-% v. F]	1,52		
Luftgehalt (angenommen)	[V.-%]	3,00	w/Fv	0,616			
Entschäumer	[kg/m ³]	0,00	Relativedichte rechnerisch	0,827			
Matrix							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteile [M. 1]	Anteile [V. 1]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]	Feststoff [M.-%]
Fließmittel	FM 209	2,00	1,82	15,83	1,10	14,39	30,00
Wasser inkl. FM	Wasser	28,00	28,00	221,65	1,00	221,65	
FM Festanteil		0,60	0,42	4,75	1,43	3,31	
Zement	CEM I 42,5 N	100,00	32,26	791,61	3,10	255,36	
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	20,00	8,70	158,32	2,30	68,84	
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	12,00	4,53	94,99	2,65	35,85	
Summe		160,6	73,9	1271,32	2,17	585,00	
Zuschläge							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteil [%]	Trocken-M [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]	Wasserg. [M.-%]	Feucht-M [kg/m ³]
Sand	ME 0,1 - 0,5	100,00	1020,25	2,65	385,00	0,00	1020,25
Summe		100,00	1020,25	2,65	385,00	0,00	1020,25
Fasern							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteil [M.-%]	Zugabe [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]		
Fasern	DM 6/0,17	0,00	0,00	7,85	0,00		
Summe		0,00	0,00	7,85	0,00		
Stoffraum							
Ausgangsstoff	Anteil [V.-%]	Anteil [M.-%]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]		
Luft	3,00	0,00	0,00	0,00	30,00		
Matrix	58,50	55,48	1271,32	2,17	585,00		
Zuschläge	38,50	44,52	1020,25	2,65	385,00		
Fasern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Summe		100,00	2291,57	4,82	1000,00		
Wasserzugabe gesamt		[l/m ³]	210,57				
Mischung							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Einwaage	Einheit	Mischungsvolumen [dm ³]			
Wasser	Wasser	526,4	g	2,50			
Zement	CEM I 42,5 N	1.979,0	g				
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	395,8	g	Frischbetonrohddichte			
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	237,5	g	2.389,5 kg/m³			
Zusatzstoff 3		0,0	g	Luftporengehalt			
Fließmittel	FM 029	39,6	g				
Sand 1	ME 0,1 - 0,5	2.550,6	g	1,0 %			
Faser 1	DM 6/0,17	0,0	g				

Tabelle 5-10: Mischungszusammensetzung UHPC VV1

UHPC VV2							
Materialbezeichng:	UHPC ohne Stahlfasern		Datum:	28.08.2012			
hergestellt von:	Jan Girzikowsky		Uhrzeit:	10:30			
Anzahl der Proben:	3 Prismen						
Anforderungen							
W/B-Wert		0,28	Fließmittel	[M.-% v. Z]	2,00		
Sand trocken	[dm ³ /m ³]	385,00	Fließmittel	[M.-% v. F]	1,33		
Luftgehalt (angenommen)	[V.-%]	2,00	w/Fv	0,536			
Entschäumer	[kg/m ³]	0,00	Relativedichte rechnerisch	0,847			
Matrix							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteile [M. 1]	Anteile [V. 1]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]	Feststoff [M.-%]
Fließmittel	FM 209	2,00	1,82	14,75	1,10	13,41	30,00
Wasser inkl. FM	Wasser	28,00	28,00	206,46	1,00	206,46	
FM Festanteil		0,60	0,42	4,42	1,43	3,08	
Zement	CEM I 42,5 N	100,00	32,26	737,37	3,10	237,86	
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	20,00	8,70	147,47	2,30	64,12	
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	30,00	11,32	221,21	2,65	83,48	
Summe		178,6	80,69	1316,94	2,21	595,00	
Zuschläge							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteil [%]	Trocken-M [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]	Wasserg. [M.-%]	Feucht-M [kg/m ³]
Sand	ME 0,1 - 0,5	100,00	1020,25	2,65	385,00	0,00	1020,25
Summe		100,00	1020,25	2,65	385,00	0,00	1020,25
Fasern							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteil [M.-%]	Zugabe [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]		
Fasern	DM 6/0,17	0,00	0,00	7,85	0,00		
Summe		0,00	0,00	7,85	0,00		
Stoffraum							
Ausgangsstoff	Anteil [V.-%]	Anteil [M.-%]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]		
Luft	2,00	0,00	0,00	0,00	20,00		
Matrix	59,50	56,35	1316,94	2,21	595,00		
Zuschläge	38,50	43,65	1020,25	2,65	385,00		
Fasern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Summe		100,00	2337,19	4,86	1000,00		
Wasserzugabe gesamt		[l/m ³]	196,14				
Mischung							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Einwaage	Einheit	Mischungsvolumen [dm ³]			
Wasser	Wasser	490,3	g	2,50			
Zement	CEM I 42,5 N	1.843,4	g				
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	368,7	g	Frischbetonrohddichte			
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	553,0	g	2.383,0 kg/m³			
Zusatzstoff 3		0,0	g	Luftporengehalt			
Fließmittel	FM 029	36,9	g				
Sand	ME 0,1 - 0,5	2.550,6	g	2,2 %			
Fasern	DM 6/0,17	0,0	g				

Tabelle 5-11: Mischungszusammensetzung UHPC VV2 mit Stahlfasern

UHPC VV2 SF							
Materialbezeichng:	UHPC mit Stahlfasern		Datum:	28.08.2012			
hergestellt von:	Jan Girzikowsky		Uhrzeit:	12:00			
Anzahl der Proben:	3 Prismen						
Anforderungen							
W/B-Wert	0,28	Fließmittel	[M.-% v. Z]	2,00			
Sand trocken [dm ³ /m ³]	360,00	Fließmittel	[M.-% v. F]	1,33			
Luftgehalt (angenommen) [V.-%]	2,00	w/Fv		0,536			
Entschäumer [kg/m ³]	0,00	Relativedichte rechnerisch		0,843			
Matrix							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteile [M. 1]	Anteile [V. 1]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]	Feststoff [M.-%]
Fließmittel	FM 209	2,00	1,82	14,74	1,10	13,40	30,00
Wasser inkl. FM	Wasser	28,00	28,00	206,30	1,00	206,30	
FM Festanteil		0,60	0,42	4,42	1,43	3,08	
Zement	CEM I 42,5 N	100,00	32,26	736,77	3,10	237,67	
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	20,00	8,70	147,35	2,30	64,07	
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	30,00	11,32	221,03	2,65	83,41	
Summe		178,6	80,69	1315,88	2,21	594,52	
Zuschläge							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteil [%]	Trocken-M [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]	Wasserg. [M.-%]	Feucht-M [kg/m ³]
Sand	ME 0,1 - 0,5	100,00	954,00	2,65	360,00	0,00	954,00
Summe		100,00	954,00	2,65	360,00	0,00	954,00
Fasern							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteil [M.-%]	Zugabe [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]		
Fasern	DM 6/0,17	100,00	200,00	7,85	25,48		
Summe		100,00	200,00	7,85	25,48		
Stoffraum							
Ausgangsstoff	Anteil [V.-%]	Anteil [M.-%]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]		
Luft	2,00	0,00	0,00	0,00	20,00		
Matrix	59,45	53,28	1315,88	2,21	594,52		
Zuschläge	36,00	38,63	954,00	2,65	360,00		
Fasern	2,55	8,10	200,00	7,85	25,48		
Summe		100,00	2469,88	12,71	1000,00		
Wasserzugabe gesamt		[l/m ³]	195,98				
Mischung							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Einwaage	Einheit	Mischungsvolumen [dm ³]			
Wasser	Wasser	627,1	g	3,20			
Zement	CEM I 42,5 N	2.357,7	g				
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	471,5	g	Frischbetonrohddichte			
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	707,3	g	Luftporengehalt			
Zusatzstoff 3		0,0	g				
Fließmittel	FM 029	47,2	g				
Sand	ME 0,1 - 0,5	3.052,8	g				
Fasern	DM 6/0,17	640,0	g				

Tabelle 5-12: Mischungszusammensetzung UHPC GV

UHPC GV							
Materialbezeichng:	UHPC mit Stahlfasern	Datum:	28.08.2012				
hergestellt von:	Jan Girzikowsky	Uhrzeit:	14:00				
Anzahl der Proben:	Versuchsbogen						
Anforderungen							
W/B-Wert	0,28	Fließmittel	[M.-% v. Z]	2,00			
Sand trocken [dm ³ /m ³]	360,00	Fließmittel	[M.-% v. F]	1,33			
Luftgehalt (angenommen) [V.-%]	2,00	w/Fv		0,536			
Entschäumer [kg/m ³]	0,00	Relativedichte rechnerisch		0,843			
Matrix							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteile [M. 1]	Anteile [V. 1]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]	Feststoff [M.-%]
Fließmittel	FM 209	2,00	1,82	14,74	1,10	13,40	30,00
Wasser inkl. FM	Wasser	28,00	28,00	206,30	1,00	206,30	
FM Festanteil		0,60	0,42	4,42	1,43	3,08	
Zement	CEM I 42,5 N	100,00	32,26	736,77	3,10	237,67	
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	20,00	8,70	147,35	2,30	64,07	
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	30,00	11,32	221,03	2,65	83,41	
Summe		178,6	80,69	1315,88	2,21	594,52	
Zuschläge							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteil [%]	Trocken-M [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]	Wasserg. [M.-%]	Feucht-M [kg/m ³]
Sand	ME 0,1 - 0,5	100,00	954,00	2,65	360,00	0,00	954,00
Summe		100,00	954,00	2,65	360,00	0,00	954,00
Fasern							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Anteil [M.-%]	Zugabe [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]		
Fasern	DM 6/0,17	100,00	200,00	7,85	25,48		
Summe		100,00	200,00	7,85	25,48		
Stoffraum							
Ausgangsstoff	Anteil [V.-%]	Anteil [M.-%]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [dm ³]		
Luft	2,00	0,00	0,00	0,00	20,00		
Matrix	59,45	53,28	1315,88	2,21	594,52		
Zuschläge	36,00	38,63	954,00	2,65	360,00		
Fasern	2,55	8,10	200,00	7,85	25,48		
Summe		100,00	2469,88	12,71	1000,00		
Wasserzugabe gesamt		[l/m ³]	195,98				
Mischung							
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Einwaage	Einheit	Mischungsvolumen [dm ³]			
Wasser	Wasser	6.650,3	g	33,93			
Zement	CEM I 42,5 N	25.000,9	g				
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	5.000,2	g				
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	7.500,3	g	Frischbetonrohichte			
Zusatzstoff 3		0,0	g				
Fließmittel	FM 029	600,0	g	Luftporengehalt			
Sand	ME 0,1 - 0,5	32.372,1	g				
Fasern	DM 6/0,17	6.786,6	g				

5.5 Versuchsdurchführung

5.5.1 Mischvorgang

Die Mischungen wurden im Labormaßstab mittels eines Intensivmischers der Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG mit einem Fassungsvermögen von 4,5 l hergestellt (Abbildung 5-4, links).

Für die Herstellung der Mischungen für den Großversuch kam ein Intensivmischer der Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG mit einem Fassungsvermögen von 50 l zum Einsatz (Abbildung 5-4, rechts).



Abbildung 5-4: Intensivmischer

5.5.2 Frischbetonprüfungen

5.5.2.1 Fließmaß

Am Frischbeton wurde, wie schon in Kapitel 3.3.2.1 beschrieben, das Fließmaß in Anlehnung an ÖNORM B 3343 bestimmt.

Tabelle 5-13: Fließmaß

Mischungsbezeichnung		gemessene Durchmesser		Fließmaß
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d [cm]
UHPC	VV1	355	365	36,0
	VV2	335	325	33,0

5.5.2.2 Luftporengehalt

Der Luftporengehalt wurde, wie in Kapitel 3.3.2.2 beschrieben, in Anlehnung an ÖNORM B 3343 mit dem Druck-Ausgleichsverfahren bestimmt.

Tabelle 5-14: Luftporengehalt

Mischungsbezeichnung		Luftporengehalt
		[%]
UHPC	VV1	1,0
	VV2	2,2

5.5.3 Festbetonprüfungen

5.5.3.1 Biegezugfestigkeit

Mittels der in Kapitel 3.3.5.1 beschriebenen Dreipunkt-Biegezugprüfung wurde in Anlehnung an ÖNORM EN 196-1 die Biegezugfestigkeit an prismatischen Probekörpern bestimmt.

5.5.3.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde, wie in Kapitel 3.3.5.2 beschrieben, an den Restprismen aus der Biegezugprüfung in Anlehnung an ÖNORM EN 196-1 ermittelt.

5.5.3.3 Ergebnisse der Festbetonprüfungen

Tabelle 5-15: Festigkeitskennwerte UHPC GV

Probennummer	Abmessungen		Biegezugprüfung			Druckprüfung				
	d ₁	d ₂	F _{max}	σ _{max}	Abw.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	
	[mm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[%]		
UHPC GV/1	40,0	40,0	6.205,29	14,54	0,95	288,98	180,61	1,26	40x40	
						457,76	190,31	6,70	40x62,5	
UHPC GV/2	40,0	40,3	6.534,81	15,20	3,54	276,06	172,54	3,26	40x40	
						454,08	181,63	1,83	40x62,5	
UHPC GV/3	40,0	40,9	6.137,24	14,07	4,16	294,50	184,06	3,20	40x40	
						488,70	195,48	9,60	40x62,5	
UHPC GV/4	40,0	40,4	6.427,36	14,91	1,57	281,97	176,23	1,19	40x40	
						455,37	182,15	2,12	40x62,5	
			f_{ctm}	14,68		f_{cm(40)}	178,36	f_{cm(62,5)}	187,39	
Legende	d ₁	Breite Prüfkörper			f _{ctm}					
	d ₂	Höhe Prüfkörpers			f _{cm}					
		Ausgeschiedener Wert, Abweichung > ±10% vom Mittelwert								
	1	Lunker ausserhalb der Bruchzone an der Prismenunterseite								
	2	Lunker in der Bruchzone an der Prismenunterseite								
	3	Lunker ausserhalb der Druckzone								
4	Lunker in der Druckzone am seitlichen (a), oberen (b) Prismenrand									

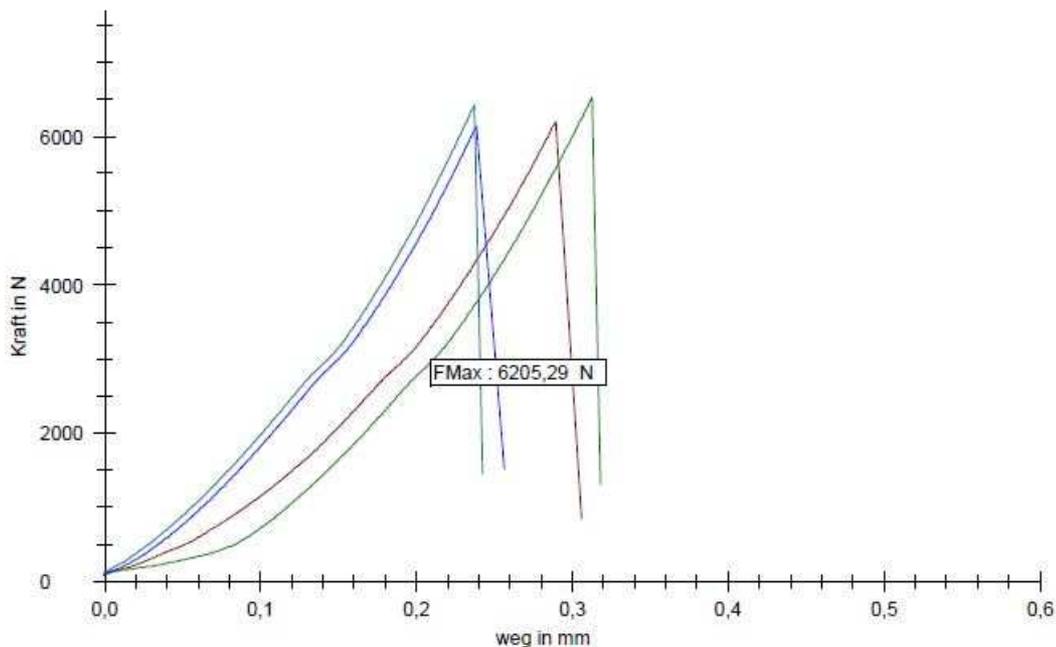


Abbildung 5-5: Kraft-Weg-Diagramm Biegezugprüfung

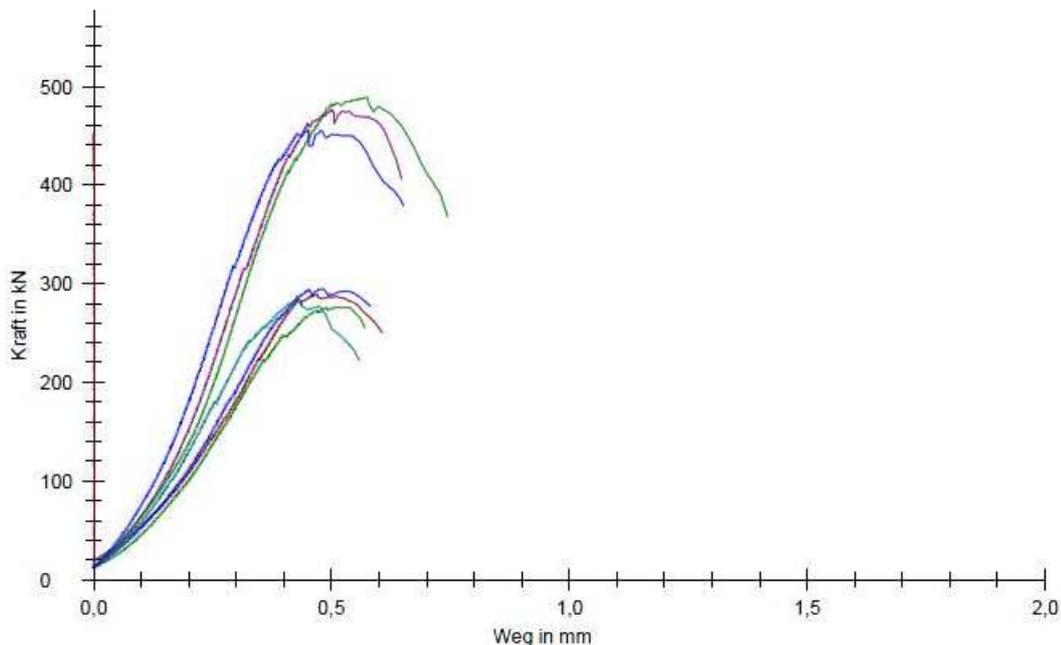


Abbildung 5-6: Kraft-Weg-Diagramm Druckversuche

5.5.4 Betonieren des Bogensegments

Die in Kapitel 5.4 angeführte Betonmischung UHPC GV wurde nach Bestimmung der Frischbetoneigenschaften in die in Kapitel 5.2 beschriebene Textilschalung eingebracht.

Zur Vorbereitung wurde das Textilgewebe intensiv vorgehängt, um zu verhindern, dass dem Frischbeton von dem saugfähigen Gewebe zu viel Wasser entzogen wird.

In einem ersten Versuchsschritt wurde ein aus handelsüblichen POLO-KAL Rohren zusammengesetzter Einfülltrichter zur Befüllung des textilen Schalungssystems verwendet. Ziel dieser Einfüllvorrichtung war, eine kurze Fließstrecke vor dem Erreichen der Schalung zu schaffen, auf der sich der Frischbeton zum einen teilweise entlüften kann. Zum anderen sollten sich die beigemischten Stahlfasern entlang der Einfüllstrecke bereits in Fließrichtung orientieren, um die Abstände zwischen den eng liegenden Polfäden bereits eingeregelt zu durchfließen.

Beim Einfüllvorgang zeigte sich, dass die Fließgeschwindigkeit des Betons im Schalungsgewebe derart gering war, dass es zu einem Aufstau der Mischung in der Einfüllöffnung kam, welcher den erhofften Vorteil des Einfülltrichters zunichtemachte. Aus diesem Grund wurde in weiterer Folge auf den Einsatz des Einfülltrichters verzichtet.



Abbildung 5-7: Einfülltrichter

Das Einbringen des Betons in die Einbringöffnung am Scheitelpunkt des Bogens erfolgte händisch mittels einer handelsüblichen Maurerpfanne.



Abbildung 5-8: Manueller Einfüllvorgang

Beim Einfüllen des im Großmaßstab gemischten Frischbetons zeigte sich sofort zu Beginn des Versuchs, dass die auf Grund ihres im Labormaßstab bestimmten Fließmaßes als ausreichend fließfähig identifizierte Mischung nicht alleine zufolge der Schwerkraft in der Lage war, selbständig das textile Schalungssystem auszufüllen. Aus diesem Grund wurde der Versuch kurzfristig unterbrochen, um den Fließmittelgehalt der Mischung derart einzustellen, dass die Frischbetonkonsistenz für das selbständige Ausfüllen der Schalung ausreichend war.

Des Weiteren wurde die Bogenschalung auf einem Rütteltisch platziert, um ein vollständiges Ausfüllen der Textilschalung zu gewährleisten.

So konnte erreicht werden, dass die Bogenschalung zur Gänze mit dem ultrahochfesten Feinbeton ausgefüllt wurde.



Abbildung 5-9: Vollständig ausbetoniertes Schalungssystem

5.5.5 Ausschalen des Bogensegments

Nach einer Erhärungszeit von sieben Tagen wurde der nicht weiter nachbehandelte Beton ausgeschalt.



Abbildung 5-10: Erhärtetes Bogensegment vor dem Ausschalen

Das Entfernen der textilen Konterschaltung erfolgte händisch durch Abreißen der oberen Decklage des Gewebes. Hier zeigte sich deutlich der aufwandstechnische Vorteil des textilen Schalungssystems, da die obere Schalhaut ohne Zuhilfenahme von Werkzeug innerhalb von Sekunden entfernt werden konnte.

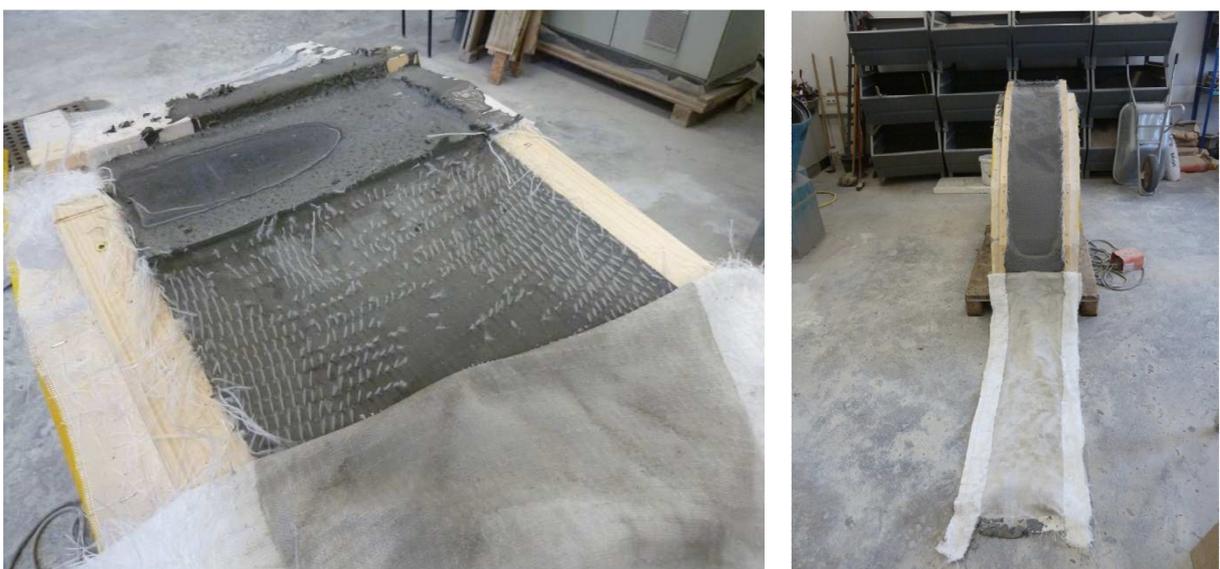


Abbildung 5-11: Manueller Ausschalvorgang

Die nach dem Abreißen der Decklage im Betonkörper verbleibenden Abstandsfäden des Zweiwandgewebes wurden in einem zweiten Arbeitsschritt mit einer handelsüblichen Lötlampe abgebrannt.



Abbildung 5-12: Abstandsfäden des Zweiwandgewebes



Abbildung 5-13: Entfernen der Abstandsfäden mittels Lötlampe

5.5.6 Belastungstest

Nachdem das Bogensegment weitere 42 Tage auf der tragenden Grundschalung aushärtete, wurde das vollständig ausgeschaltete Bogensegment in die im Labor des Instituts für Hochbau und Technologie befindliche Prüfmaschine gehoben und mit den messtechnischen Einrichtungen ausgestattet.



Abbildung 5-14: Bogensegment in der Prüfmaschine

Am Bogenscheitel wurde zur Lasteinleitung eine Stahlplatte angebracht, auf der eine Druckmessdose sowie ein Wegaufnehmer installiert wurden.



Abbildung 5-15: Kraftmessdose und Wegaufnehmer

Zur Aufzeichnung des Verformungsverhaltens wurden sowohl an der Scheitelunterseite als auch an der Bogenaußenseite im Drittelpunkt Dehnmessstreifen mittels eines Komponentenklebstoffs befestigt.



Abbildung 5-16: Dehnmessstreifen

Bei der abschließenden Belastungsprüfung wurde die planmäßig langsam aufzubringende Prüfkraft aufgrund eines Bedienungsfehlers plötzlich induziert, wodurch der Bogen schlagartig versagte.



Abbildung 5-17: Bogensegment nach der Belastungsprüfung

Die Aufzeichnung des Prüfgerätes ergab eine Bruchlast von ca. 23 kN (vgl. Abbildung 5-18). Aufgrund der kurzen Einwirkungsdauer konnten mit den aufgetragenen Dehnmessstreifen keine aussagekräftigen Messwerte aufgezeichnet werden.

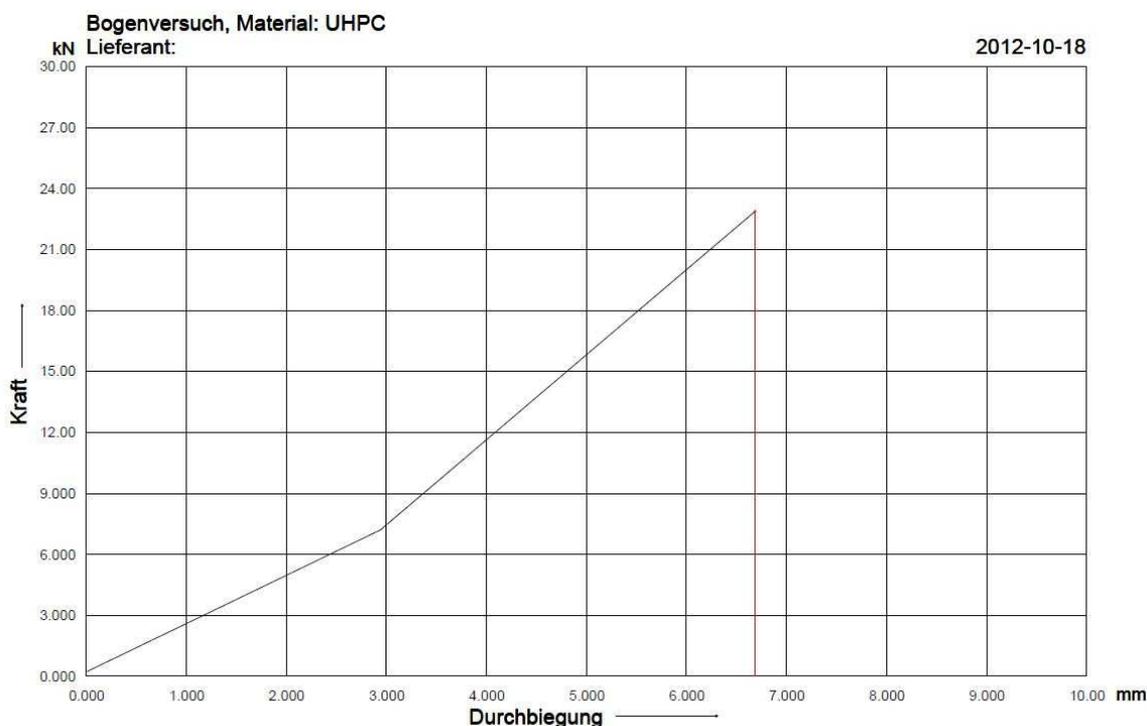


Abbildung 5-18: Kraft-Weg-Diagramm des Belastungstests

Mit der im Belastungstest gemessenen Bruchlast wurden am statischen Ersatzsystem die Schnittgrößen des Bogensegments berechnet, um die erreichte Biegezugfestigkeit des großformatigen Prüfkörpers mit den Ergebnissen der Biegezugprüfung an den Normprismen vergleichen zu können.

Das maßgebende Biegemoment an der Bruchstelle am Scheitelpunkt beträgt bei der gemessenen Bruchlast 3,84 kNm (vgl. Abbildung 5-19).

BELASTUNG

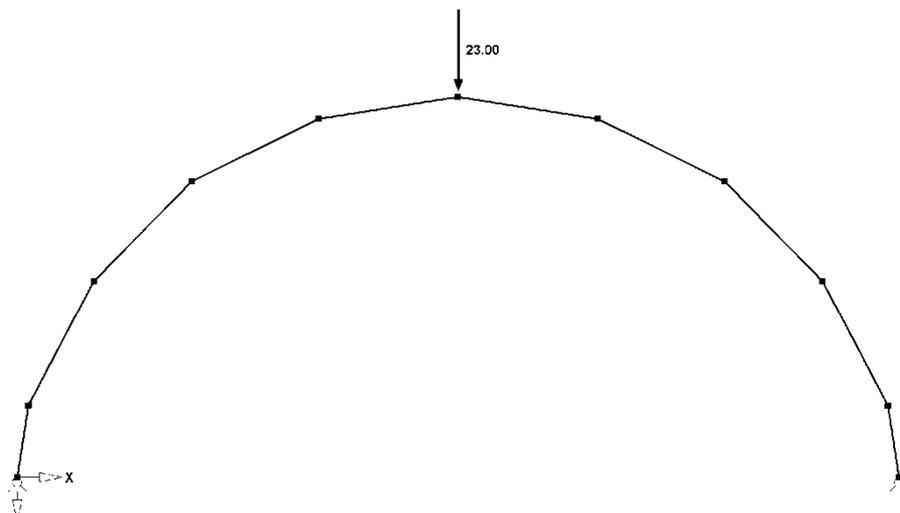
BASISANGABEN DER LASTFÄLLE

LF-Nr.	LF-Bezeichnung	Faktor	Überlagerungsart	Eigengewicht
1	Eigengewicht Beton	1.00	Ständig	1.00
2	Prüflast	1.00	Ständig	-

BELASTUNG

LF 2 - Prüflast
[kN]

Entgegen der Y-Richtung



KNOTENKRÄFTE

LF 2

Nr.	Belastete Knoten	Px [kN]	Knotenkräfte PY [kN]	Pz [kN]
1	6	0.000	0.000	23.000

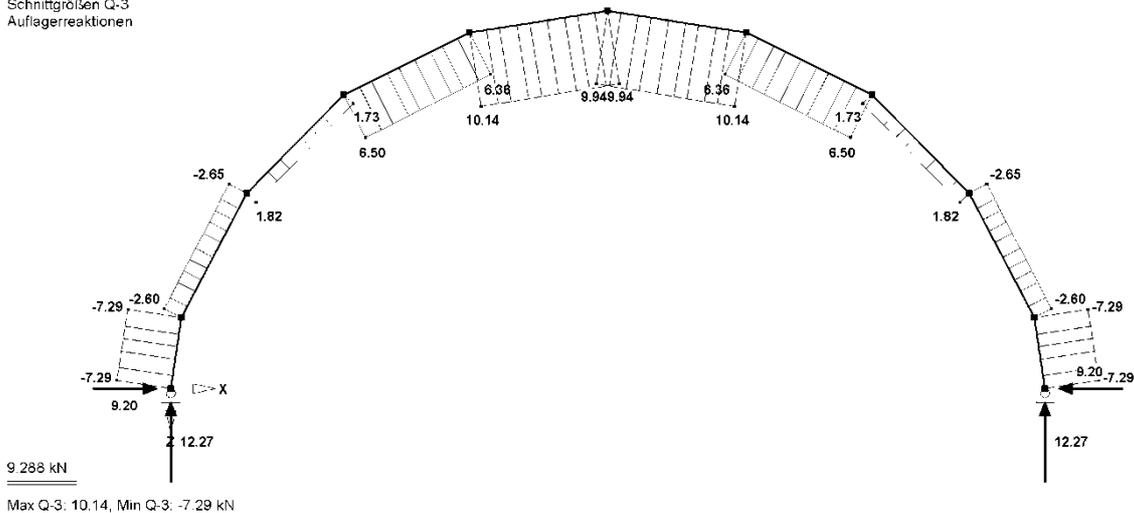
LF-GRUPPEN

LG-Nr.	LG-Bezeichnung	Faktor	Beiwert GammaM	Lastfälle in LG
1	Charakteristische Werte - Prüflast	1.00	1.10	LF1 + LF2

ERGEBNISSE - PRÜFLAST

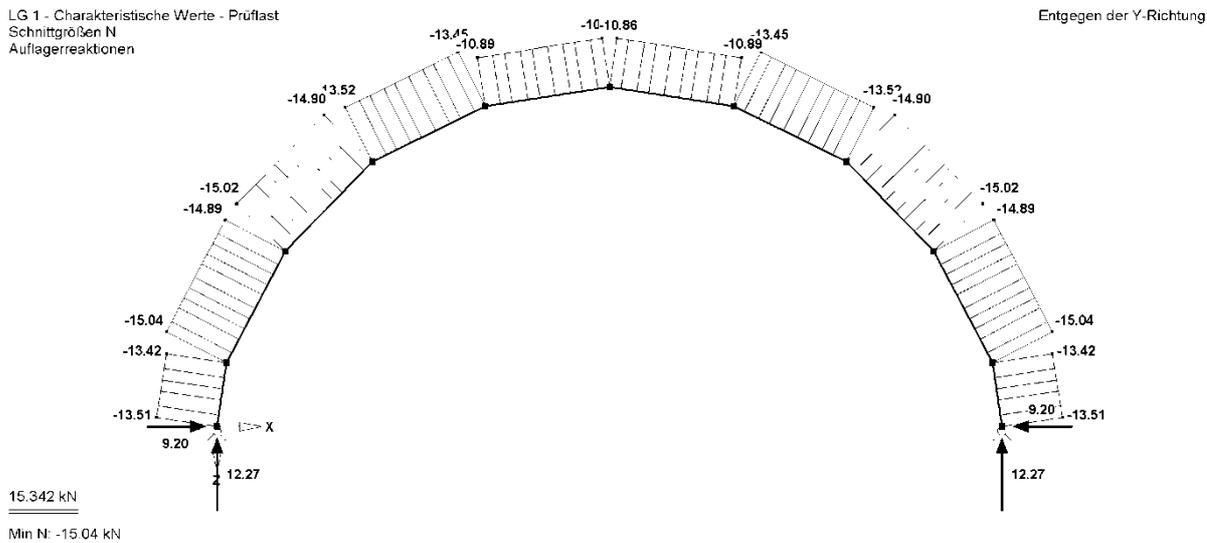
LG 1 - Charakteristische Werte - Prüflast
Schnittgrößen Q-3
Auflagerreaktionen

Entgegen der Y-Richtung



ERGEBNISSE - PRÜFLAST

LG 1 - Charakteristische Werte - Prüflast
Schnittgrößen N
Auflagerreaktionen



ERGEBNISSE - PRÜFLAST

LG 1 - Charakteristische Werte - Prüflast
Schnittgrößen M-2
Auflagerreaktionen

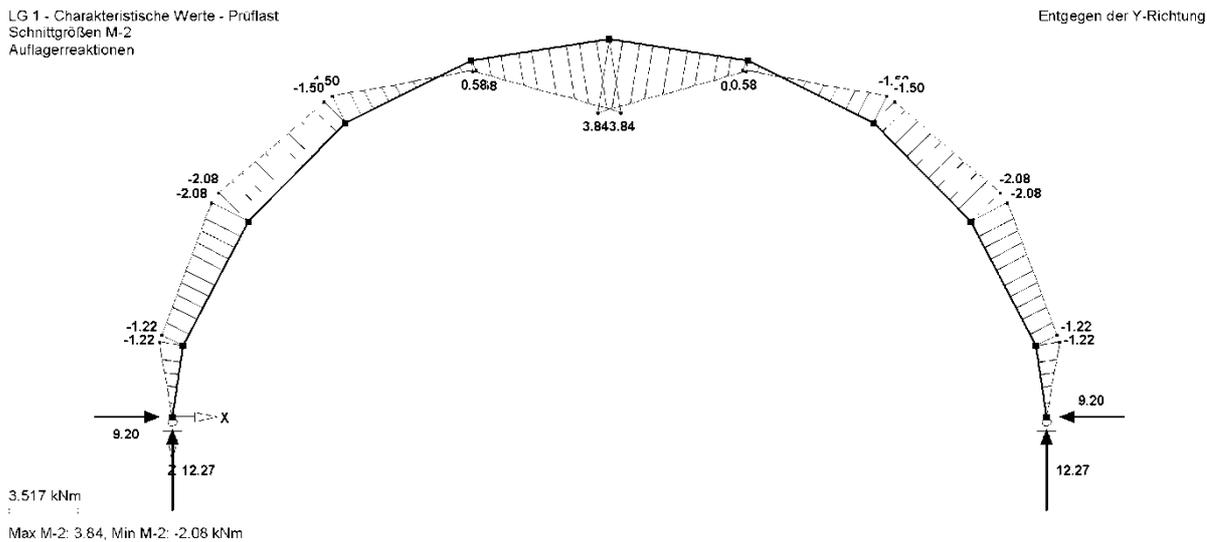


Abbildung 5-19: Schnittgrößen am Bogensegment

Für die maßgebende Stelle des Biegemoments am Scheitelpunkt können die Biegezugspannungen wie folgt ermittelt werden.

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{30 \cdot 7^2}{6} = 245 \text{ cm}^3$$

Gleichung 5-1: Widerstandsmoment des Betonquerschnitts

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{384 \text{ kNcm}}{245 \text{ cm}^3} = 1,567 \text{ kN/cm}^2 \triangleq 15,67 \text{ N/mm}^2$$

Gleichung 5-2: Biegezugspannung am Querschnittsrand

Der Vergleich mit den in der Biegezugprüfung ermittelten Werten (vgl. Kapitel 5.5.3.15.5.3.3) zeigt, dass die an einer Serie von vier Normenprismen im Mittel gemessene Biegezugspannung von 14,68 N/mm² in etwa mit der rechnerischen Bruchspannung des Belastungstests übereinstimmt.



Abbildung 5-20: Bogensegment nach dem Belastungstest

Anschließend wurden die Bruchflächen augenscheinlich beurteilt. Es zeigte sich, dass in den höher gelegenen Querschnittsbereichen (Scheitelpunkt) nur mehr wenige Stahlfasern vorhanden waren, die sich zudem an der Bogenunterseite abgesetzt hatten.



Abbildung 5-21: Bruchfläche am Scheitelpunkt

Hingegen wiesen die unteren Bruchflächen (Drittelpunkt) einen deutlich höheren Stahlfasergehalt auf, was darauf hindeutet, dass es beim Einbringen des Betons zu einer ungewünschten Entmischung von Fasern und Betonmatrix gekommen ist.



Abbildung 5-22: Bruchfläche im Drittelpunkt

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Ziel der Arbeit, geeignete Betonrezepturen für die Befüllung von Einwegschalungen aus textilen Zweiwandgeweben zu entwickeln und zu prüfen wurde erreicht. Des Weiteren konnte in Versuchen an textilen Schalungskörpern nachgewiesen werden, dass das vorgeschlagene Betonierverfahren zur Herstellung schräger Flächen ohne Konterschalung geeignet ist.

Die Abstimmung der Betonrezepturen auf die eingesetzten 3D-Textilien erfolgte durch Modifikation aus institutseigenen Forschungen bekannter Mischungszusammensetzungen hochfester und ultrahochfester Betone, die sich durch ihren feinkörnigen Zuschlag für die Anwendung in Abstandsgeweben eignen.

Ein ausreichend hohes Fließmaß und weitgehend selbstverdichtende Eigenschaften konnten durch die Beigabe eines Hochleistungsfließmittels und eine Optimierung des Mischvorgangs erreicht werden. Fließmaße von 29 cm beim hochfesten Beton bzw. 30 cm und 31 cm bei den ultrahochfesten Betonen ließen sich durch Fließmittelgehalte von 5,0 M.-% bis 6,0 M.-% bezogen auf den Zementgehalt einstellen. Um den bei derartig hohen Fließmittelgehalten üblicherweise auftretenden Entmischungerscheinungen entgegenzuwirken, wurden die Zusatzstoffe mengenmäßig angepasst. Die stabilsten Mischungen wurden mit, jeweils auf den Zementgehalt bezogenen, Mikrosilika-Anteilen von 20,0 M.-% und Quarzmehlgehalten zwischen 12,0 M.-% und 24,0 M.-% hergestellt. Außerdem ergaben vergleichende Versuche, dass mit zunehmender Homogenisierung der Mischung durch langes und intensives Mischen die Fließfähigkeit ebenfalls gesteigert werden kann.

Festigkeitsprüfungen an Prismen nach 28 Tagen ergaben Druckfestigkeiten von 116 N/mm² (HPC), 122 N/mm² (UHPC1) und 164 N/mm² (UHPC2 mit Stahlfasern) sowie Biegezugfestigkeiten von 12,8 N/mm² (HPC), 15,1 N/mm² (UHPC1) und 21,2 N/mm² (UHPC2). Somit kann belegt werden, dass es sich bei den entwickelten Mischungen um extrem fließfähige, selbstverdichtende, hochfeste bzw. ultrahochfeste Betone handelt.

Versuchsreihen an 30 cm x 30 cm großen, 60° gegen die Horizontale geneigten, textilen Schalungskörpern dokumentieren die Anwendbarkeit der entworfenen Betone in dreidimensionalen Abstandsgeweben. Die Zweiwandtextile konnten ohne die Anwendung verdichtender Maßnahmen vollständig befüllt werden. Durch den Einsatz eines rasch erhärtenden Portlandzements erreichten die Probekörper schon nach weniger als 24 Stunden eine ausschalfähige Festigkeit.

Die ausgehärteten Probekörper wiesen eine parallele und maßgenaue Geometrie sowie eine porenfreie, ebenmäßige Oberfläche auf. Sie belegen somit zumindest im Labormaßstab, dass die Herstellung von Betonkörpern mit hoher Oberflächenqualität auch durch eine Konterschaltung aus Gewebedecklagen möglich ist.

Die an den textilen Probekörpern nach 28 Tagen gemessenen Biegezugfestigkeiten erreichten Werte von 11,6 N/mm² (HPC-T), 13,1 N/mm² (UHPC1-T) und 22,3 N/mm² (UHPC2-T). Aufgrund des zu geringen Probenumfangs können allerdings keine fundierten Aussagen über die Beeinflussung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens durch das Betonierverfahren oder die im Beton verbleibenden Textilfasern getroffen werden.

In einem Großversuch wurde die baupraktische Eignung des zuvor im Labormaßstab entwickelten Verfahrens verifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass auch großformatige Betonbauteile mittels eines textilen Schalungssystems hergestellt werden können.

Durch die in den umfangreichen Versuchsreihen gewonnenen Erkenntnisse und die erfolgreiche Herstellung von Prototypen erscheint eine Weiterverfolgung dieser neuartigen Technologie zur Herstellung räumlich gekrümmter Flächentragwerke aus Beton sinnvoll und Erfolg versprechend.

Die Herstellung schlanker und filigraner Bauteile durch den Einsatz stahlfaserbewehrter Hochleistungsbetone, die Reduktion des Schalungsgewichts durch Substitution einer zweiten Schalungslage mit einem deutlich leichteren Textil und die Beschleunigung des Herstellungsprozesses durch die Möglichkeit das Zweiwandgewebe als verlorene Schalung ins Bauteil zu integrieren wären nur einige der Vorteile eines derartigen Betonierverfahrens.

7 Quellenverzeichnis

- [1] AUER, GERHARD: *Die graue Kunst*, Detail – Fachzeitschrift für Architektur und Baudetail, Nr. 8/1997, S. 1290-1295, Verlag: Institut für internationale Architekturdokumentation
- [2] BRAMESHUBER, WOLFGANG: *Hochleistungsbetone*, Detail – Fachzeitschrift für Architektur und Baudetail, Nr. 4/2003, S. 374-384, Verlag: Institut für internationale Architekturdokumentation
- [3] RICHTER, THOMAS: *Hochfester Beton – Hochleistungsbeton*, Verlag Bau und Technik VBT – Düsseldorf 1999
- [4] RICHTER, THOMAS: *Anwendung von Betonen mit hoher Druckfestigkeit*, Beton – Die Fachzeitschrift für Bau+Technik, Nr. 7+8/2002, S. 344-353, Verlag Bau und Technik VBT
- [5] SCHNEIDER, ULRICH: *Festbeton*, Wiener Baustofflehre Blätter – TU Wien, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 9. Auflage - Wien, 2001
- [6] SCHNEIDER, U.; HORVATH, J.: *Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen*, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Heft 8, 1. Auflage - Wien, 2003
- [7] KÖNIG, G.; VIET TUE, N.; ZINK, M.: *Hochleistungsbeton – Bemessung, Herstellung und Anwendung*, Ernst & Sohn Verlag – Berlin 2001
- [8] BORNEMANN, ROLAND: *Ultrahochfester Beton*, TU Kassel, Download: 05.07.2003, www.
- [9] USEINI, HAMIT: *Einfluss des Fasergehaltes und der Faserkombination auf die Festbetoneigenschaften von UHPC (Ultra High Performance Concrete)*, Diplomarbeit am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU Wien - Wien, 2001
- [10] SCHNEIDER, U.; HORVATH, J.; KÖNIG, G.: *Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHPC)*, In: *Beton und Stahlbetonbau 96*, 2001, Heft 7, S. 468-477, Verlag Ernst & Sohn - Berlin, 2001

- [11] PFEILER, ANDREAS: *Auswirkungen der Nachbehandlung bei höheren Temperaturen auf die Druckfestigkeit von Reactive Powder Concrete*, Diplomarbeit am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU Wien - Wien, 2000
- [12] BRAMESHUBER, W.; BROCKMANN, T.; HEGGER, J.: *Untersuchungen zum textilbewehrten Beton*, Beton – Die Fachzeitschrift für Bau+Technik, Nr. 9/2002, S. 424-429, Verlag Bau und Technik VBT
- [13] SCHORN, H. ET AL.: *Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von alkaliresistenten Glasfilamentgarnen in zementgebundenen Matrices*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 77-89
- [14] GRIES, T.; ROYE, A.: *Dreidimensionale Bewehrungsstrukturen für dünnwandige Bauteile*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 513-524
- [15] CURBACH, M.; JESSE, F.: *Festigkeit von textilbewehrtem Beton mit Bewehrung aus AR-Glas Filamentgarnen*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 299-312
- [16] HEGGER, J.; BRUCKERMANN, O.; CHUDOBA, R.: *Modellierung des Verbundes von Filament und Roving*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 375-386
- [17] REINHARDT, H.-W.; OZBOLT, J.; KRÜGER, M.: *Verbund von Textilien im vorgespannten Beton*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 91-99

- [18] DILGER, K. ET AL.: *Einsatz einer polymeren Phase zur Verbundverbesserung*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 133-144
- [19] RAUPACH, M.; ORLOWSKY, J.: *Dauerhaftigkeit von Textilbetonen*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 173-185
- [20] FRIEDRICH, THOMAS: *Vom Werkstoff zum Produkt dank innovativer Produktionstechnologie*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 447-465
- [21] WECK, M.; KÖLZER, P.: *Entwicklung einer innovativen Produktionsmaschine zur Herstellung von faserverstärkten Endlosbetonprofilen*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 467-480
- [22] SCHÄTZKE, C.; SCHNEIDER, H.: *Architektur mit Textilbeton - Anwendungsbeispiele*. In: *Textile reinforced structures: Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Germany, 29.9.-1.10.2003*. Hrsg.: Manfred Curbach – Dresden: Techn. Univ., 2003, S. 525-537
- [23] WULFHORST, BURKHARD: *Textilstrukturen als Betonbewehrung*, Betonwerk und Fertigteil-Technik, Nr. 3/1998, S. 133-138
- [24] CURBACH, M. ET AL.: *Neuer Baustoff Textilbeton – Sachstandsbericht zur aktuellen technischen Entwicklung*, Betonwerk und Fertigteil-Technik, Nr. 6/1998, S. 45-56
- [25] N.N.: *Bauen mit Textilbeton – Forschung praktisch angewendet*, Zement und Beton, Nr. 3/2000, S. 22

- [26] HEGGER, J; WILL, N.; MOLTER, M.: *Bruch- und Rissverhalten von textildbewehrtem Beton*, Bautechnik – Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau, Nr. 4/2002, S. 268-271, Verlag Ernst & Sohn
- [27] RAUPACH, M.; BROCKMANN, J.: *Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von textildbewehrtem Beton*, Beton – Die Fachzeitschrift für Bau+Technik, Nr. 2/2002, S. 72-78, Verlag Bau und Technik VBT
- [28] RAUPACH, M.; ORLOWSKY, J.; PUTERMAN, M.: *Untersuchungen zur Verbundverbesserung der inneren Roving-Filamente*, Beton – Die Fachzeitschrift für Bau+Technik, Nr. 3/2003, S. 114-119, Verlag Bau und Technik VBT
- [29] *Technisches Merkblatt Addiment Silicoll P*: Herstellerangaben Fa. Heidelberger Bauchemie GmbH, download: 01.01.2000, www.
- [30] *Datenblatt Glenium 51*: Herstellerangaben Fa. MBT (Schweiz) AG, Download: 04.07.2003, www.
- [31] *Bekaert Stahlfasern*
- [32] *Neue Zement- und Betonnorm*, Herausgeber: VÖZ – Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Ausgabe September 2001, Download: 05.07.2003, www.zement.at
- [33] *Zementbezeichnungen ab 2002*, Herausgeber: VÖZ – Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Download: 05.07.2003, www.zement.at
- [34] *Textildbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie*, Sonderforschungsbereich 532 der RWTH Aachen, <http://sfb532.rwth-aachen.com>
- [35] *Materialleichtbau II: Fasern und Textilien*, Skriptum Entwerfen im Leichtbau des Instituts für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart, Download: 27.09.2003, <http://www.uni-stuttgart.de/ilek/Lehre/leichtbau/>
- [36] *Technische Textilien*, Informationsbroschüre der Firma Karl Mayer Textilmaschinenfabrik GmbH, Download: 16.10.2003, http://www.karlmayer.de/pdf/Technische_Textilien.pdf
- [37] *Richtlinie für die Erstellung von Diplomarbeiten*: Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft TU Wien, Download: 01.07.2003, <http://ibb.tuwien.ac.at>

- [38] *Datenblatt Quarzsand ME 31 MESK31*, Produktdatenblatt der Firma Quarzwerke Österreich GmbH, Download: 27.08.2012,
<http://www.quarzwerke.at/datenblaetter/MESK31 - ME31.pdf>
- [39] *Datenblatt Quarzmehl*, Produktdatenblatt der Firma Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG, Download: 27.08.2012,
<http://www.quarzwerke.at/datenblaetter/QuarzmehleAKW.pdf>
- [40] *Datenblatt Elkem Microsilica Grade 940*, Produktdatenblatt der Firma Elkem ASA, Materials, Download: 27.08.2012,
<http://www.elkem.com/Global/ESM/quality-safety/product-data-sheets/microsilica/Microsilica-Grade-940-pds-fibre-cement.pdf>
- [41] *Datenblatt Der Contragress*, Produktdatenblatt der Firma Lafarge Zementwerke GmbH, Download: 27.08.2012,
http://www.lafarge.at/uploads/tx_templavoila/pdb_contragress_schwarz_gelb.pdf
- [42] *Datenblatt gerade Stahldrahtfaser*, Produktdatenblatt der Firma KrampeHarex GmbH & Co. KG, Download: 27.08.2012,
http://www.krampeharex.com/pdf/Stahldrahtfaser_DM.pdf

8 Normenverzeichnis

- [ÖN-1] ÖNORM B 3303 *Betonprüfung – Ausgabe 01.09.2002*
- [ÖN-2] ÖNORM B 3304 *Betonzuschläge aus natürlichem Gestein; Begriffe, Anforderungen, Prüfungen, Lieferung und Güteüberwachung – Ausgabe 01.04.1981*
- [ÖN-3] ÖNORM B 3343 *Mauer- und Putzmörtel: Prüfverfahren für die Eigen- und Fremdüberwachung – Ausgabe 01.02.1997*
- [ÖN-4] ÖNORM B 4710-1 *Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis – Ausgabe 01.01.2002*
- [ÖN-5] ÖNORM EN 196-1 *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit – Ausgabe 01.07.1995*
- [ÖN-6] ÖNORM EN 197-1 *Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement – Ausgabe 01.12.2000*
- [ÖN-7] ÖNORM EN 12350-4 *Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß – Ausgabe 01.04.2000*
- [ÖN-8] ÖNORM EN 12350-5 *Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß – Ausgabe 01.04.2000*
- [ÖN-9] ÖNORM EN 12390-1 *Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen – Ausgabe 01.05.2001*
- [ÖN-10] ÖNORM EN 12390-2 *Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen – Ausgabe 01.05.2001*
- [ÖN-11] ÖNORM EN 12390-3 *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern – Ausgabe 01.05.2001*
- [ÖN-12] ÖNORM EN 12390-5 *Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern – Ausgabe 01.05.2001*

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Klassifizierung der Hochleistungsbetone nach [6]	18
Abbildung 2-2: Entwicklung des Textilbetons nach [12]	31
Abbildung 2-3: Verbundbauweisen	32
Abbildung 2-4: Herstellungsprozess von technischen Textilien	35
Abbildung 2-5: Stationen der Herstellung eines Gewebes aus Glasfasern [28]	40
Abbildung 2-6: Grundstrukturen von Textilien nach [23]	42
Abbildung 2-7: Bindungsarten von Geweben nach [35]	43
Abbildung 2-8: Ausführungen richtungsorientierter Strukturen nach [36]	45
Abbildung 2-9: Axiale Gelegestrukturen	46
Abbildung 2-10: In Feinbetonmatrix eingebettetes Roving [28]	53
Abbildung 2-11: Verbundspannungs-Schlupf Beziehung nach [17]	54
Abbildung 2-12: τ -s Beziehungen für AR-Glas und gerippten Betonstahl nach [16]	55
Abbildung 2-13: Ausbildung von Matrixbrücken in einem Roving [16]	56
Abbildung 2-14: Haftbrückenmodell Schorn nach [16]	57
Abbildung 2-15: Vergleich von Zugversuchen an Textilien und Rovings nach [16]	59
Abbildung 2-16: Einflüsse auf die Tragfähigkeit eines Verbundquerschnitts	60
Abbildung 2-17: Geometrie und Feinheit der untersuchten Textilien nach [26]	60
Abbildung 2-18: Einfluss des Bewehrungsgrades auf die Wirksamkeit nach [26]	61
Abbildung 2-19: Einfluss der Querschnittsgeometrien der Rovings nach [26]	62
Abbildung 2-20: Einfluss der Beschichtung auf die Biegetragfähigkeit nach [26]	63
Abbildung 2-21: Einfluss der Faserneigung auf die Zugtragfähigkeit nach [26]	64
Abbildung 2-22: Schematische Darstellung der Schadensmechanismen nach [27]	65
Abbildung 2-23: Geometrie und Versuchsaufbau der Zugversuche nach [12]	68
Abbildung 2-24: Versuchsanordnung der Biegeversuche nach [12]	69
Abbildung 2-25: Versuche zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit nach [27]	70
Abbildung 2-26: Isometrische Darstellung Rautenfachwerktonne nach [22]	73
Abbildung 2-27: Systemskizze Rautenelement, Detail Knotenausbildung nach [22]	73
Abbildung 2-28: Gebäudekonzeption und Elementausbildung nach [22]	75
Abbildung 3-1: Organigramm Versuchsablauf	79
Abbildung 3-2: Ausgangsstoffe	81
Abbildung 3-3: Zuschlag (links), Quarzmehl und Mikrosilika (rechts)	84

Abbildung 3-4: Wasser und Fließmittel (links), Stahlfasern (rechts)	85
Abbildung 3-5: Mörtelmischer gemäß ÖNORM EN 196-1	88
Abbildung 3-6: Auswirkung verschiedener Mischvorgänge auf die Fließfähigkeit	90
Abbildung 3-7: Bestimmung des Fließmaßes, Setztrichter	91
Abbildung 3-8: Prüfgerät zur Bestimmung des Luftporengehalts	91
Abbildung 3-9: Form für prismatische Probekörper gemäß ÖNORM EN 196-1	92
Abbildung 3-10: Lagerung der Probekörper im Wasserbad	92
Abbildung 3-11: Prüfmaschine zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit	93
Abbildung 3-12: Prüfungsanordnung beim Dreipunkt-Biegezugversuch	94
Abbildung 3-13: Prüfmaschine und Prüfungsanordnung, Druckfestigkeitsprüfung	95
Abbildung 3-14: Fließmaß UHPC	97
Abbildung 3-15: Einfluss des Fließmittelgehalts auf das Fließmaß	98
Abbildung 3-16: Einfluss der Mischdauer auf das Fließmaß	98
Abbildung 3-17: Einfluss des Quarzmehlgehalts auf das Fließmaß	99
Abbildung 3-18: Einfluss des Stahlfasergehalts auf das Fließmaß	100
Abbildung 3-19: Faser-Einbindung in unterschiedlichen Betonen nach [6]	101
Abbildung 3-20: Fließmaß	101
Abbildung 3-21: Fließmaß HPC	102
Abbildung 3-22: Einfluss des Mikrosilikagehalts auf das Fließmaß	103
Abbildung 3-23: Entmischungserscheinungen	104
Abbildung 3-24: Fehlerhafte Prüfkörper	105
Abbildung 3-25: Kennwerte der Druckfestigkeit UHPC1	108
Abbildung 3-26: Kennwerte der Biegezugfestigkeit UHPC1	109
Abbildung 3-27: Kennwerte der Druckfestigkeit UHPC2	111
Abbildung 3-28: Kennwerte der Biegezugfestigkeit UHPC2	112
Abbildung 3-29: Verlauf der Biegezugfestigkeit UHPC2	112
Abbildung 3-30: Kennwerte der Druckfestigkeit HPC	115
Abbildung 3-31: Kennwerte der Biegezugfestigkeit HPC	115
Abbildung 3-32: Bruchbild Biegezugprüfung: links UHPC1, rechts UHPC2	116
Abbildung 3-33: Bruchbild Druckfestigkeitsprüfung: links UHPC1, rechts UHPC2	116
Abbildung 3-34: Spannungs-Dehnungs-Diagramme	123
Abbildung 4-1: Textiles Zweiwandgewebe: Decklage und Abstandsfäden	125
Abbildung 4-2: Schalungskollektive	127
Abbildung 4-3: Systemskizze konventionelles Schalungssystem	128

Abbildung 4-4: Systemskizze textiles Schalungssystem	129
Abbildung 4-5: Textiles Schalungssystem	129
Abbildung 4-6: Detailansicht Textiles Schalungssystem	130
Abbildung 4-7: Befüllung des Zweiwandgewebes	131
Abbildung 4-8: Ausgeschalte Probekörper	131
Abbildung 4-9: Prüfungsanordnung beim Dreipunkt-Biegezugversuch	132
Abbildung 4-10: Teilweise ausgeschalte Probekörper	135
Abbildung 4-11: Ebenmäßigkeit der Probekörper	136
Abbildung 4-12: Prozentuelle Abweichungen in Abhängigkeit von der Einfüllhöhe	137
Abbildung 4-13: Oberflächenbeschaffenheit konventionell (links), textil (rechts)	137
Abbildung 4-14: Biegezugfestigkeit der Probenkollektive	139
Abbildung 4-15: Spannungs-Dehnungs-Diagramme (Biegezugbeanspruchung)	141
Abbildung 4-16: Bruchbild HPC konventionell (links), textil (rechts)	142
Abbildung 4-17: Bruchbild UHPC1 konventionell (links), textil (rechts)	142
Abbildung 4-18: Gefügestruktur HPC konventionell (links), textil (rechts)	143
Abbildung 4-19: Gefügestruktur UHPC1 konventionell (links), textil (rechts)	143
Abbildung 5-1: Systemskizze textiles Schalungssystem	147
Abbildung 5-2: Textiles Schalungssystem	148
Abbildung 5-3: Einfüllöffnung	148
Abbildung 5-4: Intensivmischer	159
Abbildung 5-5: Kraft-Weg-Diagramm Biegezugprüfung	161
Abbildung 5-6: Kraft-Weg-Diagramm Druckversuche	162
Abbildung 5-7: Einfülltrichter	163
Abbildung 5-8: Manueller Einfüllvorgang	163
Abbildung 5-9: Vollständig ausbetoniertes Schalungssystem	164
Abbildung 5-10: Erhärtetes Bogensegment vor dem Ausschalen	165
Abbildung 5-11: Manueller Ausschalvorgang	165
Abbildung 5-12: Abstandsfäden des Zweiwandgewebes	166
Abbildung 5-13: Entfernen der Abstandsfäden mittels Lötlampe	166
Abbildung 5-14: Bogensegment in der Prüfmaschine	167
Abbildung 5-15: Kraftmessdose und Wegaufnehmer	167
Abbildung 5-16: Dehnmessstreifen	168
Abbildung 5-17: Bogensegment nach der Belastungsprüfung	168
Abbildung 5-18: Kraft-Weg-Diagramm des Belastungstests	169

Abbildung 5-19: Schnittgrößen am Bogensegment	171
Abbildung 5-20: Bogensegment nach dem Belastungstest	172
Abbildung 5-21: Bruchfläche am Scheitelpunkt	173
Abbildung 5-22: Bruchfläche im Drittelpunkt	173

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Charakteristische Eigenschaften von Hochleistungsbetonen	19
Tabelle 2-2: Kennwerte von Zement und Zusatzstoffen nach [3]	21
Tabelle 2-3: Beispielrezepturen für hochfesten Beton nach [3]	22
Tabelle 2-4: Beispielrezepturen für ultrahochfesten Beton nach [7]	28
Tabelle 2-5: Mechanische Eigenschaften von Polyesterfasern nach [35]	36
Tabelle 2-6: Mechanische Eigenschaften von Kohlestofffasern nach [24]	37
Tabelle 2-7: Mechanische Eigenschaften von Aramid-Fasern nach [24]	38
Tabelle 2-8: Mechanische Eigenschaften von Glasfasern nach [24]	39
Tabelle 2-9: Eigenschaften von Filamenten und Rovings aus AR-Glas nach [15]	41
Tabelle 2-10: Kennwerte der Polymerdispersionen nach [18]	50
Tabelle 2-11: Mischungszusammensetzungen nach [18]	50
Tabelle 2-12: Mischungszusammensetzung ausgewählter Betone nach [12], [28]	51
Tabelle 2-13: Zugversuche an Filamenten eines AR-Glasrovings nach [27]	66
Tabelle 3-1: Kornzusammensetzung Zuschlag	82
Tabelle 3-2: Sieblinien Zuschlag	83
Tabelle 3-3: Mischungszusammensetzungen Serie M1 (UHPC)	86
Tabelle 3-4: Mischungszusammensetzungen Serie M4 (HPC)	87
Tabelle 3-5: Drehzahlen der Mischschaufel	88
Tabelle 3-6: Geteste Mischvorgänge	89
Tabelle 3-7: Fließmaß UHPC	96
Tabelle 3-8: Fließmaß HPC	102
Tabelle 3-9: Entmischungserscheinungen	103
Tabelle 3-10: Festigkeitskennwerte UHPC1	106
Tabelle 3-11: Festigkeitskennwerte UHPC2	110
Tabelle 3-12: Festigkeitskennwerte HPC	113
Tabelle 3-13: Vorselektion relevanter Mischungen	117
Tabelle 3-14: Ausgewählte Mischungen	119
Tabelle 3-15: Mischungszusammensetzungen	120
Tabelle 4-1: Übersicht Probenkollektive	124
Tabelle 4-2: Technische Daten des Abstandsgewebes	126
Tabelle 4-3: Übersicht Probekörper	130
Tabelle 4-4: Abweichungen von der Solldicke	136

Tabelle 4-5: Maximale Biegezugspannungen	138
Tabelle 5-1: Korngrößenverteilung gemäß Produktdatenblatt des Herstellers [38]	149
Tabelle 5-2: Sieblinie Zuschlag	150
Tabelle 5-3: Chemische Analyse (in Gew.-%) [38]	150
Tabelle 5-4: Physikalische Eigenschaften [38]	150
Tabelle 5-5: Trockensiebrückstand, DIN 53734 (in Gew.-%) [39]	151
Tabelle 5-6: Chemische Analyse, DIN 51001 [39]	151
Tabelle 5-7: Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung [41]	152
Tabelle 5-8: Technische Daten	153
Tabelle 5-9: Mischungszusammensetzung UHPC VV1	155
Tabelle 5-10: Mischungszusammensetzung UHPC VV1	156
Tabelle 5-11: Mischungszusammensetzung UHPC VV2 mit Stahlfasern	157
Tabelle 5-12: Mischungszusammensetzung UHPC GV	158
Tabelle 5-13: Fließmaß	160
Tabelle 5-14: Luftporengehalt	160
Tabelle 5-15: Festigkeitskennwerte UHPC GV	161

11 Gleichungsverzeichnis

Gleichung 2-1: Zugtragfähigkeit eines Textilbetonquerschnitts nach [26]	64
Gleichung 3-1: Biegezugfestigkeit	93
Gleichung 3-2: Druckfestigkeit	94
Gleichung 4-1: Biegezugfestigkeit	132
Gleichung 5-1: Widerstandsmoment des Betonquerschnitts	171
Gleichung 5-2: Biegezugspannung am Querschnittsrand	172

12 Begriffsbestimmungen

Faden

Oberbegriff für Fasern, Garne und Zwirne

Faser

Linienförmiges Gebilde, das sich mit den Methoden der Textiltechnik weiterverarbeiten lässt.

Siehe auch → **Filament**.

Filament

Endlosfaser

Kettfaden

Verläuft über die gesamte Länge einer Gewebbahn [35].

Siehe auch → **Schussfaden**.

Reißlänge

Diejenige Länge R eines Fadens, bei der er unter seinem Eigengewicht reißt [35].

Ausgewählte Beispiele für Reißlängen R in km:

Glasfaser:	- 140
Hochfeste Polyesterfasern:	74,1 – 94,2
Baumwollfasern:	23,2 – 46,4
Spannstahl:	22,6
Holz:	17,0
Stahl S355:	6,2 – 8,0
Beton:	0,1

Schussfaden

Liegt senkrecht zum Kettfaden, wird mit Schiffchen oder Düsenwebung eingetragen [35].

Spinnfaser

Stapelfaser, begrenzte Länge

tex

Kenngroße des Querschnitts von Filamenten oder Rovings in der Textiltechnik. An Stelle der Querschnittsfläche wird die „Feinheit“ oder „Titer“ als auf die Länge bezogene Masse angegeben [35].

1 tex = 1 g/1.000m, 1 dtex = 1 g/10.000m

Eine heute nicht mehr gebräuchliche Titerangabe ist denier.

1 den = 1 g/9.000m

13 Anhang A

Zusammenstellung der Mischungszusammensetzungen aus den Vorversuchen.

Serie M1 (UHPC)	Seite
M1-01	A.2
M1-02	A.3
M1-03	A.4
M1-04	A.5
M1-05	A.6
M1-06	A.7
M1-07	A.8
M1-08	A.9
M1-09	A.10
M1-10	A.11
M1-11	A.12
M1-12	A.13
M1-13	A.14
M1-14	A.15
M1-15	A.16
M1-16	A.17
M1-17	A.18
M1-18	A.19
M1-19	A.20
Serie M4 (HPC)	
M4-01	A.21
M4-02	A.22
M4-03	A.23
M4-04	A.24
M4-05	A.25
M4-06	A.26
M4-07	A.27
M4-08	A.28
M4-09	A.29

M1-01						
Materialbezeichng.	UHPC-200-4,0-12-A		Datum	22.07.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	15:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.065,8	2.650	0,402		
Summe	Zuschlag	1.065,8		0,402		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	28,0	1.100	0,025	[%] von B	[kg/m³] k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0 0,4
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0 2,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4 0,8
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU) 0,300	
Summe	Zusatz	1.176,0		0,568	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z) 0,320	
Summe	Gesamt	2.241,8		1,000	V_w/V_m 0,704	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ 140,0	
Fließmittel FM	4,00	3,33	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU 840,0	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU 980,0	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU 924,0	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34) 0,34	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26) 0,77	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10% 0,09	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Grobsand GS	0/1 mm	1.278,9	1.279,0	100,01	1.065,8	47,54
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,22
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,00
Fließmittel FM	Glenium 51	33,6	33,5	99,70	27,9	1,25
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,24
Quarzmehl QM		100,8	101,0	100,20	84,2	3,75
Summe		2.690,1	2.690,5		2.242,1	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	271	274	27,3
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		fast	2,5 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		fast	2 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			6 min	-		

M1-02						
Materialbezeichng.	UHPC-200-4,5-12-A		Datum	22.07.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	14:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.057,3	2.650	0,399		
Summe	Zuschlag	1.057,3		0,399		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	31,5	1.100	0,029	% von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.179,5		0,571	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.236,8		1,000	V_w/V_m	
	% v.Z	% v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	4,50	3,75	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34+1,00)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	% v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0023	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Grobsand GS	0/1 mm	2.454,0	2.454,0	100,00	1.057,3	49,11
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	1.624,7	1.625,0	100,02	700,1	32,52
Wasser W	Trinkwasser	519,9	520,0	100,02	224,0	10,41
Fließmittel FM	Glenium 51	73,1	73,0	99,85	31,5	1,46
Mikrosilika SF	Silicol P	324,9	325,0	100,02	140,0	6,50
Quarzmehl QM		195,0	195,0	100,02	84,0	3,90
Summe		4.996,7	4.997,0		2.153,0	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	277	281	27,9
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		fast	2,5 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		fast	2 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			6 min	2,95%		

M1-03						
Materialbezeichng.	UHPC-200-4,9-12-A		Datum	22.07.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	11:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.082,6	2.650	0,409		
Summe	Zuschlag	1.082,6		0,409		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	21,0	1.100	0,019	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.169,0		0,561	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.251,6		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]			FA+SF+AHWZ
Fließmittel FM	3,00	2,50	Bindemittelgehalt B [kg/m³]			Z+ZU
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]			Z+k×ZU
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)			Z+QM+ZU
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]			-
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]			-
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung 10%			-
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]			0,0010
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [g]	Einwaage [g]	tatsächl. Mischung		Masse
Grobsand GS	0/1 mm	1.082,6	1.082,5	[%]	[kg/m³]	[%]
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	700,0	99,99	1.082,5	47,80
Wasser W	Trinkwasser	224,0	224,0	100,00	700,0	30,91
Fließmittel FM	Glenium 51	21,0	34,0	161,90	224,0	9,89
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	140,0	100,00	34,0	1,50
Quarzmehl QM		84,0	84,0	100,00	140,0	6,18
Summe		2.251,6	2.264,5		84,0	3,71
					2.264,5	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min			
3. Wasser/FM getrennt begeben		fast	2,5 min	302	308	30,5
4. Restlichen Zuschlag begeben		fast	2 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			6 min	-		

M1-04						
Materialbezeichng.	UHPC-200-5,0-12-A		Datum	23.07.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	12:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.048,9	2.650	0,396		
Summe	Zuschlag	1.048,9		0,396		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	35,0	1.100	0,032	% von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.183,0		0,574	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.231,9		1,000	V_w/V_m	
	% v.Z	% v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34+1,00)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	% v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0023	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Grobsand GS	0/1 mm	2.412,4	2.412,5	100,00	1.048,9	47,00
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	1.610,0	1.610,0	100,00	700,0	31,36
Wasser W	Trinkwasser	515,2	515,5	100,06	224,1	10,04
Fließmittel FM	Glenium 51	80,5	80,5	100,00	35,0	1,57
Mikrosilika SF	Silicol P	322,0	322,0	100,00	140,0	6,27
Quarzmehl QM		193,2	193,0	99,90	83,9	3,76
Summe		5.133,3	5.133,5		2.232,0	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	297	298	29,8
3. Wasser/FM getrennt begeben		fast	2 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		fast	1,5 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			5 min	3,15%		

M1-05						
Materialbezeichng.	UHPC-200-5,0-12-D		Datum	12.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	11:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.048,9	2.650	0,396		
Summe	Zuschlag	1.048,9		0,396		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	35,0	1.100	0,032	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.183,0		0,574	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.231,9		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Grobsand GS	0/1 mm	1.258,7	1.258,5	99,99	1.048,8	46,99
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,36
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,04
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	42,0	100,00	35,0	1,57
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,27
Quarzmehl QM		100,8	101,0	100,20	84,2	3,77
Summe		2.678,3	2.678,5		2.232,1	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	1 min	284	285	28,5
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		slow	3 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		slow	3 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min	4,15%		

M1-06						
Materialbezeichng.	UHPC-200-5,5-12-A		Datum	23.07.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	10:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.040,5	2.650	0,393		
Summe	Zuschlag	1.040,5		0,393		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	38,5	1.100	0,035	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.186,5		0,577	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.227,0		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,50	4,58	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.248,6	1.249,0	100,04	1.040,8	46,72
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,42
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,06
Fließmittel FM	Glenium 51	46,2	46,5	100,65	38,8	1,74
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,28
Quarzmehl QM		100,8	101,0	100,20	84,2	3,78
Summe		2.672,4	2.673,5		2.227,9	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	267	271	26,9
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		fast	2,5 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		fast	2 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			6 min	-		

M1-07						
Materialbezeichng.	UHPC-200-5,5-12-B		Datum	23.07.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	13:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.040,5	2.650	0,393		
Summe	Zuschlag	1.040,5		0,393		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	38,5	1.100	0,035	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.186,5		0,577	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.227,0		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,50	4,58	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.248,6	1.249,0	100,04	1.040,8	46,72
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,42
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,06
Fließmittel FM	Glenium 51	46,2	46,5	100,65	38,8	1,74
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,28
Quarzmehl QM		100,8	101,0	100,20	84,2	3,78
Summe		2.672,4	2.673,5		2.227,9	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	256	257	25,7
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		fast	1,5 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		fast	2 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			5 min	-		

M1-08						
Materialbezeichng.	UHPC-200-5,5-12-C		Datum	23.07.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	11:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.040,5	2.650	0,393		
Summe	Zuschlag	1.040,5		0,393		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	38,5	1.100	0,035	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.186,5		0,577	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.227,0		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,50	4,58	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.248,6	1.249,0	100,04	1.040,8	46,72
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,42
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,06
Fließmittel FM	Glenium 51	46,2	46,5	100,65	38,8	1,74
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,28
Quarzmehl QM		100,8	101,0	100,20	84,2	3,78
Summe		2.672,4	2.673,5		2.227,9	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	310	312	31,1
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	-		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			

M1-09						
Materialbezeichng.	UHPC-200-6,0-12-C		Datum	23.07.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	11:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.032,0	2.650	0,389		
Summe	Zuschlag	1.032,0		0,389		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	1.100	0,038	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.190,0		0,581	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.222,0		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	6,00	5,00	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.238,4	1.238,5	100,01	1.032,1	46,44
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,50
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,09
Fließmittel FM	Glenium 51	50,4	50,5	100,20	42,1	1,89
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,30
Quarzmehl QM		100,8	101,0	100,20	84,2	3,79
Summe		2.666,4	2.667,0		2.222,5	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	313	315	31,4
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	3,55%		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			

M1-10						
Materialbezeichng.	UHPC-200-6,0-12-D		Datum	12.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	12:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	1.032,0	2.650	0,389		
Summe	Zuschlag	1.032,0		0,389		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	1.100	0,038	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		84,0	2.650	0,032	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.190,0		0,581	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.222,0		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	6,00	5,00	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	12,00	10,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.238,4	1.238,5	100,01	1.032,1	46,44
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,50
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,09
Fließmittel FM	Glenium 51	50,4	50,5	100,20	42,1	1,89
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,30
Quarzmehl QM		100,8	101,0	100,20	84,2	3,79
Summe		2.666,4	2.667,0		2.222,5	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	1 min	295	297	29,6
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		slow	3 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		slow	3 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min	-		

M1-11						
Materialbezeichng.	UHPC-200-5,0-24-D		Datum	12.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	14:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	964,9	2.650	0,364		
Summe	Zuschlag	964,9		0,364		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	35,0	1.100	0,032	% von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.267,0		0,606	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.231,9		1,000	V_w/V_m	
	% v.Z	% v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	% v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	1.157,9	1.158,0	100,01	965,0	43,23
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,36
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,04
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	42,0	100,00	35,0	1,57
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,27
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,52
Summe		2.678,3	2.678,5		2.232,1	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	1 min	275	277	27,6
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		slow	3 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		slow	3 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min	-		

M1-12						
Materialbezeichng.	UHPC-200-5,0-24-E		Datum	12.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	15:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	964,9	2.650	0,364		
Summe	Zuschlag	964,9		0,364		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	35,0	1.100	0,032	[%] von B	[kg/m³] k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0 0,4
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0 2,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4 0,8
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU) 0,308	
Summe	Zusatz	1.267,0		0,606	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z) 0,320	
Summe	Gesamt	2.231,9		1,000	V_w/V_m 0,640	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ 140,0	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU 840,0	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU 980,0	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU 1.008,0	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34) 0,34	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26) 0,77	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10% 0,09	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	1.157,9	1.158,0	100,01	965,0	43,23
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,36
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,04
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	42,0	100,00	35,0	1,57
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,27
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,52
Summe		2.678,3	2.678,5		2.232,1	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	1 min	287	290	28,9
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		fast	3 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min	-		

M1-13						
Materialbezeichng.	UHPC-200-6,0-24-E		Datum	12.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	16:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	948,0	2.650	0,358		
Summe	Zuschlag	948,0		0,358		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	1.100	0,038	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.274,0		0,612	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.222,0		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	6,00	5,00	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.137,6	1.137,5	99,99	947,9	42,66
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,50
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,09
Fließmittel FM	Glenium 51	50,4	50,5	100,20	42,1	1,89
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,30
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,56
Summe		2.666,4	2.666,5		2.222,1	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	1 min	295	297	29,6
3. Wasser/FM vorgemischt begeben		fast	3 min			
4. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min	3,65%		

M1-14						
Materialbezeichng.	UHPC-050-5,0-24-F		Datum	13.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	11:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	948,0	2.650	0,358		
Summe	Zuschlag	948,0		0,358		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	35,0	1.100	0,032	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	50,0	7.850	0,006	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.317,0		0,612	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.265,0		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,64	7,14	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.137,6	1.137,5	99,99	947,9	42,80
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,60
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,12
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	42,0	100,00	35,0	1,58
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,32
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,58
Stahlfasern	Bekaert 6mm	60,0	60,0	100,00	50,0	2,26
Summe		2.718,0	2.718,0		2.215,0	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	267	269	26,8
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	-		
6. Stahlfasern untermischen		fast	2 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			10 min			

M1-15						
Materialbezeichng.	UHPC-050-6,0-24-F		Datum	13.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	11:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	931,1	2.650	0,351		
Summe	Zuschlag	931,1		0,351		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	1.100	0,038	[%] von B	[kg/m³] k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0 0,4
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0 2,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4 0,8
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	50,0	7.850	0,006	(W+FM)/(Z+k×ZU) 0,317	
Summe	Zusatz	1.324,0		0,619	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z) 0,320	
Summe	Gesamt	2.255,1		1,000	V_w/V_m 0,640	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ 140,0	
Fließmittel FM	6,00	5,00	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU 840,0	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU 980,0	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU 1.008,0	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34) 0,34	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26) 0,77	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10% 0,09	
Stahlfasern	0,64	7,14	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [g]	Einwaage [g]	tatsächl. Mischung [%]	Masse [kg/m³]	Masse [%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.117,4	1.117,5	100,01	931,3	42,23
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,74
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,16
Fließmittel FM	Glenium 51	50,4	50,5	100,20	42,1	1,91
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,35
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,61
Stahlfasern	Bekaert 6mm	60,0	60,0	100,00	50,0	2,27
Summe		2.706,2	2.706,5		2.205,4	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	298	300	29,9
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	-		
6. Stahlfasern untermischen		fast	2 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			10 min			

M1-16						
Materialbezeichng.	UHPC-100-5,0-24-F		Datum	13.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	13:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	931,1	2.650	0,351		
Summe	Zuschlag	931,1		0,351		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	35,0	1.100	0,032	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	100,0	7.850	0,013	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.367,0		0,619	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.298,1		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	1,27	14,29	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.117,4	1.117,5	100,01	931,3	42,36
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,84
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,20
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	42,0	100,00	35,0	1,59
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,37
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,64
Stahlfasern	Bekaert 6mm	120,0	120,0	100,00	100,0	4,55
Summe		2.757,8	2.758,0		2.198,3	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	306	307	30,7
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	3,35%		
6. Stahlfasern untermischen		fast	2 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			10 min			

M1-17						
Materialbezeichng.	UHPC-100-6,0-24-F		Datum	12.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	12:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.700	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	914,3	2.650	0,345		
Summe	Zuschlag	914,3		0,345		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	1.100	0,038	% von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	100,0	7.850	0,013	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.374,0		0,625	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.288,3		1,000	V_w/V_m	
	% v.Z	% v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	6,00	5,00	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	1,27	14,29	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Feinsand FS	0/1 mm	1.097,1	1.097,0	99,99	914,2	41,77
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	31,99
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,24
Fließmittel FM	Glenium 51	50,4	50,5	100,20	42,1	1,92
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,40
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,67
Stahlfasern	Bekaert 6mm	120,0	120,0	100,00	100,0	4,57
Summe		2.745,9	2.746,0		2.188,3	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[cm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	312	314	31,3
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	-		
6. Stahlfasern untermischen		fast	2 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			10 min			

M1-18						
Materialbezeichng.	UHPC-200-5,0-24-F		Datum	13.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	16:00		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Rohdichte	Volumen		
		[kg]	[kg/m³]	[m³]		
Grobsand GS	0/4 mm	0,0	2.650	0,000		
Feinsand FS	0/1 mm	897,4	2.650	0,339		
Summe	Zuschlag	897,4		0,339		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	
Fließmittel FM	Glenium 51	35,0	1.100	0,032	[%] von B	k-Wert
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	200,0	7.850	0,025	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.467,0		0,631	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.364,4		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Quarzmehl QM	24,00	20,00	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	2,55	28,57	Mischungsvolumen [m³]		0,0012	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	1.076,8	1.077,0	100,02	897,5	37,96
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	29,60
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	9,48
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	42,0	100,00	35,0	1,48
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	5,92
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,10
Stahlfasern	Bekaert 6mm	240,0	240,0	100,00	200,0	8,46
Summe		2.837,2	2.837,5		2.364,6	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[mm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	300	302	30,1
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	3,15%		
6. Stahlfasern untermischen		fast	2 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			10 min			

M1-19						
Materialbezeichng.	UHPC-200-6,0-24-F		Datum	13.08.2003		
hergestellt von	Jan Girzikowsky		Uhrzeit	15:30		
Anzahl der Proben	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Rohdichte	Volumen		
		[kg]	[kg/m³]	[m³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.700	0,000		
Quarzsand S	0,063/1 mm	880,5	2.650	0,332		
Summe	Zuschlag	880,5		0,332		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	700,0	3.100	0,226	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	224,0	1.000	0,224	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	42,0	1.100	0,038	[%] von B	
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	210,0
Mikrosilika SF	Silicol P	140,0	2.300	0,061	30	252,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	92,4
Quarzmehl QM		168,0	2.650	0,063	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	200,0	7.850	0,025	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	1.474,0		0,638	W/Z-Wert	
Luftporen				0,030	(W/Z)	
Summe	Gesamt	2.354,5		1,000	V_w/V_m	
	[%] v.Z	[%] v.B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	140,0
Fließmittel FM	6,00	5,00	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	840,0
Quarzmehl QM	24,00	20,00	anrechenbarer Bindemittelgeh. B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	980,0
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	1.008,0
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	0,34
Mikrosilika SF	20,00	16,67	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	0,77
	[Vol.-%]	[%] v.Z	Beaufschlagung [m³]		10%	0,09
Stahlfasern	2,55	28,57	Mischungsvolumen [m³]			0,0012
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	1.056,6	1.056,5	99,99	880,4	40,86
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	840,0	840,0	100,00	700,0	32,49
Wasser W	Trinkwasser	268,8	269,0	100,07	224,2	10,40
Fließmittel FM	Glenium 51	50,4	50,5	100,20	42,1	1,95
Quarzmehl QM		201,6	201,5	99,95	167,9	7,79
Mikrosilika SF	Silicol P	168,0	168,0	100,00	140,0	6,50
Stahlfasern	Bekaert 6mm	240,0	240,0	100,00	200,0	9,28
Summe		2.825,4	2.825,5		2.154,6	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Z/QM/SF trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[mm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	321	324	32,3
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	3,05%		
6. Stahlfasern untermischen		fast	2 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			10 min			

M4-01						
Materialbeschreibung:	HPC-000-4,5-10-0,35					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	20.08.2003					
Uhrzeit:	14:00					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.622,8	2.650	0,612		
Summe	Zuschlag	1.622,8		0,612		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	157,5	1.000	0,158	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	20,3	1.100	0,018	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	123,8
Silicastaub SF	Silicol P	45,0	2.300	0,020	30	148,5
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	54,5
Quarzmehl QM		45,0	2.650	0,017	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	717,8		0,358	0,359	
Luftporen				0,030	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.340,6		1,000	0,350	
					(W/Z)	
					V_w/V_m	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	4,50	4,09	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	10,00	9,09	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Silicastaub SF	10,00	9,09	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0013	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	2.109,7	2.109,5	99,99	1.622,7	69,32
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	585,0	585,0	100,00	450,0	19,22
Wasser W	Trinkwasser	204,8	205,0	100,12	157,7	6,74
Fließmittel FM	Glenium 51	26,3	26,5	100,66	20,4	0,87
Quarzmehl QM		58,5	58,5	100,00	45,0	1,92
Silicastaub SF	Silicol P	58,5	58,5	100,00	45,0	1,92
Summe		3.042,7	3.043,0		2.340,8	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[mm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	222	226	224
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	-		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			

M4-02						
Materialbeschreibung:	HPC-000-5,0-10-0,35					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	20.08.2003					
Uhrzeit:	15:00					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.617,4	2.650	0,610		
Summe	Zuschlag	1.617,4		0,610		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	157,5	1.000	0,158	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	22,5	1.100	0,020	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	123,8
Silicastaub SF	Silicol P	45,0	2.300	0,020	30	148,5
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	54,5
Quarzmehl QM		45,0	2.650	0,017	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	720,0		0,360	0,364	
Luftporen				0,030	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.337,4		1,000	0,350	
					(W/Z)	
					V_w/V_m	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,55	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	10,00	9,09	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Silicastaub SF	10,00	9,09	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0013	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	2.102,6	2.102,5	99,99	1.617,3	69,18
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	585,0	585,0	100,00	450,0	19,25
Wasser W	Trinkwasser	204,8	205,0	100,12	157,7	6,75
Fließmittel FM	Glenium 51	29,3	29,5	100,85	22,7	0,97
Quarzmehl QM		58,5	58,5	100,00	45,0	1,92
Silicastaub SF	Silicol P	58,5	58,5	100,00	45,0	1,92
Summe		3.038,6	3.039,0		2.337,7	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[mm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	248	253	250,5
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min			
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			
				Luftporengehalt		
				-		

M4-03						
Materialbeschreibung:	HPC-000-5,0-10-0,37					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	20.08.2003					
Uhrzeit:	12:00					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.593,5	2.650	0,601		
Summe	Zuschlag	1.593,5		0,601		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	166,5	1.000	0,167	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	22,5	1.100	0,020	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	123,8
Silicastaub SF	Silicol P	45,0	2.300	0,020	30	148,5
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	54,5
Quarzmehl QM		45,0	2.650	0,017	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	729,0		0,369	0,382	
Luftporen				0,030	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.322,5		1,000	0,370	
					V _w /V _m	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,55	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	10,00	9,09	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Silicastaub SF	10,00	9,09	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0013	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	2.071,6	2.071,5	99,99	1.593,5	68,60
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	585,0	585,0	100,00	450,0	19,37
Wasser W	Trinkwasser	216,5	216,5	100,02	166,5	7,17
Fließmittel FM	Glenium 51	29,3	29,5	100,85	22,7	0,98
Quarzmehl QM		58,5	58,5	100,00	45,0	1,94
Silicastaub SF	Silicol P	58,5	58,5	100,00	45,0	1,94
Summe		3.019,3	3.019,5		2.322,7	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[mm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	269	273	271
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min			
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			
				Luftporengehalt		
				-		

M4-04						
Materialbeschreibung:	HPC-000-5,0-20-0,35					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	21.08.2003					
Uhrzeit:	10:30					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m ³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.572,4	2.650	0,593		
Summe	Zuschlag	1.572,4		0,593		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	157,5	1.000	0,158	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	22,5	1.100	0,020	[%] von B	[kg/m ³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	123,8
Silicastaub SF	Silicol P	45,0	2.300	0,020	30	148,5
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	54,5
Quarzmehl QM		90,0	2.650	0,034	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	765,0		0,377	0,364	
Luftporen				0,030	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.337,4		1,000	0,350	
					(W/Z)	
					V _w /V _m	
					0,793	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m ³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,55	Bindemittelgehalt B [kg/m ³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	20,00	18,18	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m ³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm ³]		(1×0,34)	
Silicastaub SF	10,00	9,09	Prüfung Festbeton [dm ³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m ³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m ³]		0,0013	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [g]	Einwaage [g]	tatsächl. Mischung [%]	Masse [kg/m ³]	Masse [%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	2.044,1	2.044,0	99,99	1.572,3	67,26
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	585,0	585,0	100,00	450,0	19,25
Wasser W	Trinkwasser	204,8	205,0	100,12	157,7	6,75
Fließmittel FM	Glenium 51	29,3	29,5	100,85	22,7	0,97
Quarzmehl QM		117,0	117,0	100,00	90,0	3,85
Silicastaub SF	Silicol P	58,5	58,5	100,00	45,0	1,92
Summe		3.038,6	3.039,0		2.337,7	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d [mm]
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min			
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	268	272	270
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min	Luftporengehalt		
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min	-		
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			

M4-05						
Materialbeschreibung:	HPC-000-5,0-25-0,35					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	21.08.2003					
Uhrzeit:	11:30					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m ³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.549,9	2.650	0,585		
Summe	Zuschlag	1.549,9		0,585		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	157,5	1.000	0,158	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	22,5	1.100	0,020	[%] von B	[kg/m ³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	123,8
Silicastaub SF	Silicol P	45,0	2.300	0,020	30	148,5
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	54,5
Quarzmehl QM		112,5	2.650	0,042	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	787,5		0,385	0,364	
Luftporen				0,030	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.337,4		1,000	0,350	
					(W/Z)	
					V _w /V _m	
					0,760	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m ³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,55	Bindemittelgehalt B [kg/m ³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	25,00	22,73	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m ³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm ³]		(1×0,34)	
Silicastaub SF	10,00	9,09	Prüfung Festbeton [dm ³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m ³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m ³]		0,0013	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m ³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	2.014,9	2.015,0	100,01	1.550,0	66,29
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	585,0	585,0	100,00	450,0	19,25
Wasser W	Trinkwasser	204,8	205,0	100,12	157,7	6,74
Fließmittel FM	Glenium 51	29,3	29,5	100,85	22,7	0,97
Quarzmehl QM		146,3	146,5	100,17	112,7	4,82
Silicastaub SF	Silicol P	58,5	58,5	100,00	45,0	1,92
Summe		3.038,6	3.039,5		2.338,1	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[mm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	251	254	252,5
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min			
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			
				Luftporengehalt		
				-		

M4-06						
Materialbeschreibung:	HPC-000-5,0-20-0,37					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	21.08.2003					
Uhrzeit:	12:00					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.548,5	2.650	0,584		
Summe	Zuschlag	1.548,5		0,584		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	166,5	1.000	0,167	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	22,5	1.100	0,020	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	123,8
Silicastaub SF	Silicol P	45,0	2.300	0,020	30	148,5
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	54,5
Quarzmehl QM		90,0	2.650	0,034	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	774,0		0,386	0,382	
Luftporen				0,030	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.322,5		1,000	0,370	
					(W/Z)	
					V _w /V _m	
					0,838	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,55	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	20,00	18,18	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Silicastaub SF	10,00	9,09	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0013	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	2.013,1	2.013,0	99,99	1.548,5	66,67
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	585,0	585,0	100,00	450,0	19,37
Wasser W	Trinkwasser	216,5	216,5	100,02	166,5	7,17
Fließmittel FM	Glenium 51	29,3	29,5	100,85	22,7	0,98
Quarzmehl QM		117,0	117,0	100,00	90,0	3,87
Silicastaub SF	Silicol P	58,5	58,5	100,00	45,0	1,94
Summe		3.019,3	3.019,5		2.322,7	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[mm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	270	272	271
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min			
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min	Luftporengehalt		
				-		

M4-07						
Materialbeschreibung:	HPC-000-6,0-20-0,37					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	21.08.2003					
Uhrzeit:	13:00					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.537,7	2.650	0,580		
Summe	Zuschlag	1.537,7		0,580		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	166,5	1.000	0,167	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	27,0	1.100	0,025	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	123,8
Silicastaub SF	Silicol P	45,0	2.300	0,020	30	148,5
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	54,5
Quarzmehl QM		90,0	2.650	0,034	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	778,5		0,390	0,391	
Luftporen				0,030	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.316,2		1,000	0,370	
					V _w /V _m	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	6,00	5,45	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	20,00	18,18	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Silicastaub SF	10,00	9,09	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0013	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [g]	Einwaage [g]	tatsächl. Mischung [%]	Masse [%]	
Quarzsand S	0,063/1 mm	1.999,0	1.999,0	100,00	1.537,7	66,39
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	585,0	585,0	100,00	450,0	19,43
Wasser W	Trinkwasser	216,5	216,5	100,02	166,5	7,19
Fließmittel FM	Glenium 51	35,1	35,0	99,72	26,9	1,16
Quarzmehl QM		117,0	117,0	100,00	90,0	3,89
Silicastaub SF	Silicol P	58,5	58,5	100,00	45,0	1,94
Summe		3.011,1	3.011,0		2.316,2	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d [mm]
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min			
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	282	285	283,5
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min			
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min	Luftporengehalt		
				2,15%		

M4-08						
Materialbeschreibung:	HPC-000-6,0-20-0,37					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	26.08.2003					
Uhrzeit:	12:00					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.485,9	2.650	0,561		
Summe	Zuschlag	1.485,9		0,561		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	166,5	1.000	0,167	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	27,0	1.100	0,025	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	135,0
Silicastaub SF	Silicol P	90,0	2.300	0,039	30	162,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	59,4
Quarzmehl QM		90,0	2.650	0,034	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	823,5		0,409	0,358	
Luftporen				0,030	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.309,4		1,000	0,370	
					V _w /V _m	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	6,00	5,00	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	20,00	16,67	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1,00+1×0,34)	
Silicastaub SF	20,00	16,67	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0023	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [g]	Einwaage [g]	tatsächl. Mischung [%]	Masse [kg/m³]	Masse [%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	3.417,5	3.417,5	100,00	1.485,9	64,34
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	1.035,0	1.035,0	100,00	450,0	19,49
Wasser W	Trinkwasser	383,0	383,0	100,01	166,5	7,21
Fließmittel FM	Glenium 51	62,1	62,0	99,84	27,0	1,17
Quarzmehl QM		207,0	207,0	100,00	90,0	3,90
Silicastaub SF	Silicol P	207,0	207,0	100,00	90,0	3,90
Summe		5.311,5	5.311,5		2.309,3	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d [mm]
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min			
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	278	280	279
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min			
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min	Luftporengehalt		
				2,00%		

M4-09						
Materialbeschreibung:	HPC-000-5,0-20-0,40					
durchgeführt von:	Jan Girzikowsky					
Datum:	26.08.2003					
Uhrzeit:	13:30					
Anzahl der Proben:	3 Prismen 40×40×160 mm					
Werte je m³ Beton (Stoffraumrechnung)						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m³]	Volumen [m³]		
Kies K	1/2 mm	0,0	2.650	0,000		
Quarzsand S	0/4 mm	1.487,4	2.650	0,561		
Summe	Zuschlag	1.487,4		0,561		
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	450,0	3.100	0,145	k-Wert-Ansatz ÖN B 4710-1	
Wasser W	Trinkwasser	180,0	1.000	0,180	max. Zugabemenge	k-Wert
Fließmittel FM	Glenium 51	22,5	1.100	0,020	[%] von B	[kg/m³]
Flugasche FA		0,0	2.300	0,000	25	135,0
Silicastaub SF	Silicol P	90,0	2.300	0,039	30	162,0
AHWZ		0,0	2.300	0,000	11	59,4
Quarzmehl QM		90,0	2.650	0,034	W/B-Wert	
Stahlfasern	Bekaert 6mm	0,0	7.850	0,000	(W+FM)/(Z+k×ZU)	
Summe	Zusatz	832,5		0,419	0,375	
Luftporen				0,020	W/Z-Wert	
Summe	Gesamt	2.319,9		1,000	0,400	
					V _w /V _m	
	[%] von Z	[%] von B	Zusatzstoffe ZU [kg/m³]		FA+SF+AHWZ	
Fließmittel FM	5,00	4,17	Bindemittelgehalt B [kg/m³]		Z+ZU	
Quarzmehl QM	20,00	16,67	anrechenbarer Bindemittelgehalt B _A [kg/m³]		Z+k×ZU	
Flugasche FA	0,00	0,00	Mehlkorngehalt (< 0,125 mm)		Z+QM+ZU	
AHWZ	0,00	0,00	Prüfung Frischbeton [dm³]		(1×0,34)	
Silicastaub SF	20,00	16,67	Prüfung Festbeton [dm³]		(3×0,26)	
	[Vol.-%]	[%] von Z	Beaufschlagung [m³]		10%	
Stahlfasern	0,00	0,00	Mischungsvolumen [m³]		0,0013	
Werte je Mischung						
Ausgangsstoff	Bezeichnung	Gewicht	Einwaage	tatsächl. Mischung		Masse
		[g]	[g]	[%]	[kg/m³]	[%]
Quarzsand S	0,063/1 mm	1.933,6	1.933,5	99,99	1.487,3	64,11
Zement Z	CEM I 42,5 R HS	585,0	585,0	100,00	450,0	19,40
Wasser W	Trinkwasser	234,0	234,0	100,00	180,0	7,76
Fließmittel FM	Glenium 51	29,3	29,5	100,85	22,7	0,98
Quarzmehl QM		117,0	117,0	100,00	90,0	3,88
Silicastaub SF	Silicol P	117,0	117,0	100,00	90,0	3,88
Summe		3.015,9	3.016,0		2.320,0	100,00
Mischvorgang				Fließmaß		
Beschreibung		Geschw.	Dauer	d ₁	d ₂	d
1. Zement/Quarzmehl/Mikrosilika trocken vormischen		slow	1 min	[mm]	[mm]	[mm]
2. Hälfte Zuschlag begeben		slow	0,5 min	286	289	287,5
3. Wasser begeben		slow	0,5 min			
4. Fließmittel begeben		fast	3 min			
5. Restlichen Zuschlag begeben		fast	3 min			
Gesamtdauer Mischvorgang			8 min			
				Luftporengehalt		
				-		

14 Anhang B

Protokolle der in den Vorversuchen durchgeführten Festigkeitsprüfungen.

Serie M1 (UHPC)	Seite
M1-01, M1-02, M1-03	B.2
M1-04, M1-05, M1-06	B.3
M1-07, M1-08, M1-09	B.4
M1-10, M1-11, M1-12	B.5
M1-13, M1-14, M1-15	B.6
M1-16, M1-17, M1-18	B.7
M1-19	B.8
Serie M4 (HPC)	
M4-01, M4-02, M4-03	B.9
M4-04, M4-05, M4-06	B.10
M4-07, M4-08, M4-09	B.11

Serie M1 (UHPC) - Festigkeiten															
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-4,0-12-A		Prüfdatum:		27.08.2003				27.08.2003					
Probenalter:		36 Tage		Uhrzeit:		11:45				12:30					
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	
M1-01/1	591,55	40,3	39,8	160,0	0,257	2.305	7.626,39	17,70	4,27	-	331,95	132,78	13,91	-	
											316,84	126,74	8,73	-	
M1-01/2	590,75	40,2	39,8	160,0	0,256	2.308	7.165,76	16,71	1,54	-	275,18	110,07	5,57	-	
											291,80	116,72	0,13	-	
M1-01/3	592,95	40,5	39,8	160,0	0,258	2.299	7.185,48	16,51	2,73	-	276,29	110,52	5,19	-	
											296,96	118,78	1,90	-	
							f_{ctm}	16,97			f_{cm}	116,57			
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-4,5-12-A		Prüfdatum:		27.08.2003				27.08.2003					
Probenalter:		36 Tage		Uhrzeit:		14:00				14:30					
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	
M1-02/1	570,80	39,2	39,8	160,0	0,250	2.287	6.527,69	16,01	5,67	-	269,84	107,94	6,13	-	
											287,15	114,86	0,11	-	
M1-02/2	572,50	39,8	39,9	160,0	0,254	2.253	6.527,69	15,49	8,73	-	301,19	120,48	4,77	-	
											279,84	111,94	2,65	-	
M1-02/3	568,15	39,2	39,8	160,0	0,250	2.276	6.956,06	17,06	0,52	-	287,88	115,15	0,14	-	
											298,89	119,56	3,97	-	
							f_{ctm}	16,19			f_{cm}	114,99			
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-4,9-12-A		Prüfdatum:		27.08.2003				27.08.2003					
Probenalter:		36 Tage		Uhrzeit:		15:15				15:30					
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	
M1-03/1	604,50	40,4	40,0	160,0	0,259	2.338	7.129,92	16,38	3,49	-	312,81	125,12	2,77	-	
											308,09	123,24	1,22	-	
M1-03/2	592,50	39,5	39,8	160,0	0,252	2.356	6.862,86	16,58	2,33	-	312,00	124,80	2,50	-	
											312,75	125,10	2,75	-	
M1-03/3	594,65	40,5	39,9	160,0	0,259	2.300	7.160,39	16,41	3,31	-	294,26	117,70	3,32	-	
											286,35	114,54	5,92	-	
							f_{ctm}	16,46			f_{cm}	121,75			
Legende		d ₁	Breite des Prüfkörpers				f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm²							
		d ₂	Höhe des Prüfkörpers				f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm²							
		l	Länge des Prüfkörpers					Ausgeschiedener Wert							
Anmerkungen (fehlerhafte Prüfkörper)		1	Lunker ausserhalb der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
		2	Lunker in der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
		3	Lunker ausserhalb der Druckzone												
		4a	Lunker in der Druckzone am seitlichen				4b	oberen Prüfkörperand							
Prüfverfahren						Biegezugprüfung				Druckprüfung					
		Belastungsverfahren:				3-Punkt-Biegezugversuch mittiger Lastangriff				zentrischer Druckversuch					
		Belastungsgeschw.				0,06 N/mm²s				0,6 N/mm²s					

Serie M1 (UHPC) - Festigkeiten														
Probendaten						Biegezugprüfung				Druckprüfung				
Materialbeschr:		UHPC-000-5,0-12-A				Prüfdatum:		27.08.2003		27.08.2003				
Probenalter:		35 Tage				Uhrzeit:		16:00		16:15				
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm ³]	Dichte [kg/m ³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung			
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	An.
M1-04/1	584,40	39,8	39,9	160,0	0,254	2.300	6.192,52	14,70	0,22	-	306,01	122,40	0,33	-
											310,48	124,19	1,12	-
M1-04/2	580,95	39,9	39,9	160,0	0,255	2.281	5.570,58	13,15	10,30	-	314,72	125,89	2,51	-
											227,54	91,02	25,89	-
M1-04/3	585,30	39,8	39,9	160,0	0,254	2.304	6.801,92	16,14	10,08	-	311,65	124,66	1,51	-
											292,28	116,91	4,80	-
							f_{ctm}	14,66			f_{cm}	122,81		
Probendaten						Biegezugprüfung				Druckprüfung				
Materialbeschr:		UHPC-000-5,0-12-D				Prüfdatum:		09.09.2003		09.09.2003				
Probenalter:		28 Tage				Uhrzeit:		12:00		12:30				
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm ³]	Dichte [kg/m ³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung			
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	An.
M1-05/1	585,20	39,7	40,2	160,0	0,255	2.292	6.311,67	14,94	1,99	-	260,08	104,03	8,78	-
											278,72	111,49	2,25	-
M1-05/2	588,45	39,9	40,2	160,0	0,257	2.293	6.213,11	14,56	4,48	-	243,81	97,52	14,49	-
											293,65	117,46	2,99	-
M1-05/3	592,95	39,8	39,5	160,0	0,252	2.357	6.770,44	16,23	6,47	-	296,56	118,62	4,01	-
											296,62	118,65	4,03	-
							f_{ctm}	15,25			f_{cm}	114,05		
Probendaten						Biegezugprüfung				Druckprüfung				
Materialbeschr:		UHPC-000-5,5-12-A				Prüfdatum:		28.08.2003		28.08.2003				
Probenalter:		36 Tage				Uhrzeit:		10:15		10:45				
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm ³]	Dichte [kg/m ³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung			
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	An.
M1-06/1	576,70	40,3	39,9	160,0	0,257	2.242	6.258,93	14,49	5,42	-	278,06	111,22	2,27	-
											278,55	111,42	2,09	-
M1-06/2	579,85	39,5	39,8	160,0	0,252	2.305	6.685,52	16,15	5,42	-	286,55	114,62	0,72	-
											286,28	114,51	0,62	-
M1-06/3	599,25	40,4	39,9	160,0	0,258	2.323	8.476,09	19,52	27,45	-	305,08	122,03	7,23	-
											272,54	109,02	4,21	-
							f_{ctm}	15,32			f_{cm}	113,80		
Legende		d ₁	Breite des Prüfkörpers				f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm ²						
		d ₂	Höhe des Prüfkörpers				f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm ²						
		l	Länge des Prüfkörpers					Ausgeschiedener Wert						
Anmerkungen (fehlerhafte Prüfkörper)		1	Lunker ausserhalb der Bruchzone an der Probekörperunterseite											
		2	Lunker in der Bruchzone an der Probekörperunterseite											
		3	Lunker ausserhalb der Druckzone											
		4a	Lunker in der Druckzone am seitlichen				4b	oberen Prüfkörperwand						
Prüfverfahren						Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		Belastungsverfahren:				3-Punkt-Biegezugversuch mittiger Lastangriff				zentrischer Druckversuch				
		Belastungsgeschw.				0,06 N/mm ² s				0,6 N/mm ² s				

Serie M1 (UHPC) - Festigkeiten															
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-5,5-12-B		Prüfdatum:		28.08.2003		28.08.2003		28.08.2003		28.08.2003			
Probenalter:		36 Tage		Uhrzeit:		11:00		11:00		11:30		11:30			
Probennummer	Gewicht	Abmessungen			Vol. V	Dichte ρ	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]		
M1-07/1	578,55	40,1	40,0	160,0	0,257	2.254	4.862,68	11,34	4,52	-	220,14	88,06	3,06	-	
											196,67	78,67	7,93	-	
M1-07/2	576,90	40,1	39,9	160,0	0,256	2.254	6.520,62	15,24	28,35	-	237,58	95,03	11,22	-	
											214,00	85,60	0,18	-	
M1-07/3	589,10	39,7	39,9	160,0	0,253	2.324	3.792,64	9,05	23,83	-	172,96	69,18	19,03	-	
											240,28	96,11	12,49	-	
							f_{ctm}	11,88			f_{cm}	85,44			
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-5,5-12-C		Prüfdatum:		28.08.2003		28.08.2003		28.08.2003		28.08.2003			
Probenalter:		36 Tage		Uhrzeit:		12:30		12:30		12:45		12:45			
Probennummer	Gewicht	Abmessungen			Vol. V	Dichte ρ	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]		
M1-08/1	570,10	38,9	39,9	160,0	0,248	2.296	6.584,03	16,36	7,81	-	271,34	108,54	5,23	-	
											288,08	115,23	0,62	-	
M1-08/2	582,05	38,4	39,9	160,0	0,245	2.374	7.250,86	18,49	4,19	-	296,88	118,75	3,69	-	
											295,49	118,20	3,20	-	
M1-08/3	580,15	38,6	39,9	160,0	0,246	2.354	7.286,71	18,39	3,62	-	269,11	107,64	6,01	-	
											297,00	118,80	3,73	-	
							f_{ctm}	17,74			f_{cm}	114,53			
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-6,0-12-C		Prüfdatum:		28.08.2003		28.08.2003		28.08.2003		28.08.2003			
Probenalter:		36 Tage		Uhrzeit:		13:00		13:00		13:30		13:30			
Probennummer	Gewicht	Abmessungen			Vol. V	Dichte ρ	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]		
M1-09/1	584,65	40,0	39,9	160,0	0,255	2.290	6.379,68	14,99	0,87	-	298,20	119,28	2,37	-	
											319,79	127,92	4,69	-	
M1-09/2	584,00	39,0	39,8	160,0	0,248	2.352	6.155,61	15,25	0,87	-	303,36	121,34	0,68	-	
											264,16	105,66	13,52	-	
M1-09/3	590,65	39,5	39,7	160,0	0,251	2.354	8.084,40	19,58	29,47	-	308,41	123,36	0,97	-	
											297,50	119,00	2,60	-	
							f_{ctm}	15,12			f_{cm}	122,18			
Legende		d ₁	Breite des Prüfkörpers				f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm ²							
		d ₂	Höhe des Prüfkörpers				f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm ²							
		l	Länge des Prüfkörpers					Ausgeschiedener Wert							
Anmerkungen (fehlerhafte Prüfkörper)		1	Lunker ausserhalb der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
		2	Lunker in der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
		3	Lunker ausserhalb der Druckzone												
		4a	Lunker in der Druckzone am seitlichen				4b	oberen Prüfkörperand							
Prüfverfahren						Biegezugprüfung				Druckprüfung					
		Belastungsverfahren:				3-Punkt-Biegezugversuch mittiger Lastangriff				zentrischer Druckversuch					
		Belastungsgeschw.				0,06 N/mm ² s				0,6 N/mm ² s					

Serie M1 (UHPC) - Festigkeiten															
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-6,0-12-D		Prüfdatum:		09.09.2003		09.09.2003							
Probenalter:		28 Tage		Uhrzeit:		13:15		13:30							
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	
M1-10/1	592,65	40,3	39,9	160,0	0,257	2.304	6.818,83	15,94	1,96	-	294,50	117,80	8,45	4b	
											281,58	112,63	3,69	4a	
M1-10/2	600,45	40,6	39,9	160,0	0,259	2.317	5.453,27	12,66	19,06	2	255,06	102,02	6,07	4b	
											217,42	86,97	19,93	4a	
M1-10/3	589,45	40,0	39,8	160,0	0,255	2.314	6.474,75	15,33	1,96	-	258,43	103,37	4,83	-	
											268,17	107,27	1,24	-	
							f_{ctm}	15,64			f_{cm}	108,62			
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-5,0-24-D		Prüfdatum:		09.09.2003		09.09.2003							
Probenalter:		28 Tage		Uhrzeit:		13:30		14:15							
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	
M1-11/1	593,10	40,7	39,8	160,0	0,259	2.288	5.444,31	12,67	24,62	2	213,28	85,31	23,33	3	
											254,99	102,00	8,34	4b	
M1-11/2	595,70	40,6	39,8	160,0	0,259	2.304	6.861,84	16,00	4,75	-	286,58	114,63	3,02	4a	
											276,28	110,51	0,69	-	
M1-11/3	591,80	40,0	39,8	160,0	0,255	2.323	7.435,30	17,60	4,75	1	271,98	108,79	2,23	-	
											301,13	120,45	8,25	4b	
							f_{ctm}	16,80			f_{cm}	111,28			
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-5,0-24-E		Prüfdatum:		09.09.2003		09.09.2003							
Probenalter:		28 Tage		Uhrzeit:		14:30		15:00							
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	
M1-12/1	596,54	40,9	40,0	160,0	0,262	2.279	7.568,35	17,35	0,82	1	196,49	78,60	32,24	4b	
											296,77	118,71	2,34	4a	
M1-12/2	601,91	40,3	39,8	160,0	0,257	2.345	7.627,49	17,92	2,46	-	310,28	124,11	6,99	-	
											277,67	111,07	4,25	-	
M1-12/3	589,82	39,3	39,8	160,0	0,250	2.357	7.140,02	17,20	1,64	-	276,67	110,67	4,60	-	
											288,59	115,44	0,48	-	
							f_{ctm}	17,49			f_{cm}	116,00			
Legende		d ₁	Breite des Prüfkörpers				f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm²							
		d ₂	Höhe des Prüfkörpers				f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm²							
		l	Länge des Prüfkörpers					Ausgeschiedener Wert							
Anmerkungen (fehlerhafte Prüfkörper)		1	Lunker ausserhalb der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
		2	Lunker in der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
		3	Lunker ausserhalb der Druckzone												
		4a	Lunker in der Druckzone am seitlichen				4b	oberen Prüfkörperwand							
Prüfverfahren						Biegezugprüfung				Druckprüfung					
		Belastungsverfahren:				3-Punkt-Biegezugversuch mittiger Lastangriff				zentrischer Druckversuch					
		Belastungsgeschw.				0,06 N/mm²s				0,6 N/mm²s					

Serie M1 (UHPC) - Festigkeiten														
Probendaten						Biegezugprüfung					Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-000-6,0-24-E				Prüfdatum:		09.09.2003			09.09.2003			
Probenalter:		28 Tage				Uhrzeit:		15:00			15:30			
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung			
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.
M1-13/1	592,05	40,3	39,8	160,0	0,257	2.307	6.570,10	15,44	0,43	-	282,12	112,85	0,54	4a
											295,87	118,35	5,44	4a
M1-13/2	594,60	39,7	40,0	160,0	0,254	2.340	7.104,17	16,78	8,20	-	277,96	111,18	0,94	-
											269,05	107,62	4,12	-
M1-13/3	597,30	40,0	39,9	160,0	0,255	2.339	6.070,09	14,30	7,78	-	262,43	104,97	6,48	-
											296,19	118,48	5,55	4a
							f_{ctm}	15,50			f_{cm}	112,24		
Probendaten						Biegezugprüfung					Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-050-5,0-24-F				Prüfdatum:		11.09.2003			11.09.2003			
Probenalter:		29 Tage				Uhrzeit:		10:30			10:45			
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung			
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.
M1-14/1	616,50	41,3	39,8	160,0	0,263	2.344	7.996,12	18,33	2,20	1	345,74	138,30	3,80	4a
											325,84	130,34	2,18	4b
M1-14/2	599,40	39,6	39,9	160,0	0,253	2.371	7.595,15	18,07	0,73	-	307,28	122,91	7,75	-
											352,62	141,05	5,86	-
M1-14/3	599,00	39,8	39,8	160,0	0,253	2.363	7.319,49	17,41	2,93	-	277,75	111,10	16,62	-
											333,99	133,60	0,27	-
							f_{ctm}	17,94			f_{cm}	133,24		
Probendaten						Biegezugprüfung					Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-050-6,0-24-F				Prüfdatum:		11.09.2003			11.09.2003			
Probenalter:		29 Tage				Uhrzeit:		11:00			11:30			
Probennummer	Gewicht [g]	Abmessungen			Vol. [dm³]	Dichte [kg/m³]	Biegezugprüfung				Druckprüfung			
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]			F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm²]	Abw. [%]	An.
M1-15/1	614,95	41,1	39,8	160,0	0,262	2.350	7.611,26	17,54	5,20	1	321,53	128,61	2,54	4a
											317,66	127,06	1,31	4b
M1-15/2	607,45	41,2	39,8	160,0	0,262	2.315	6.864,81	15,78	5,35	1	291,33	116,53	7,09	4b
											295,92	118,37	5,63	4b
M1-15/3	605,50	40,9	40,0	160,0	0,262	2.313	7.283,68	16,70	0,15	1	328,52	131,41	4,77	4b
											326,44	130,58	4,11	4a
							f_{ctm}	16,67			f_{cm}	125,43		
Legende	d ₁	Breite des Prüfkörpers					f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm²						
	d ₂	Höhe des Prüfkörpers					f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm²						
	l	Länge des Prüfkörpers						Ausgeschiedener Wert						
Anmerkungen (fehlerhafte Prüfkörper)	1	Lunker ausserhalb der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
	2	Lunker in der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
	3	Lunker ausserhalb der Druckzone												
	4a	Lunker in der Druckzone am seitlichen					4b	oberen Prüfkörperwand						
Prüfverfahren	Belastungsverfahren:					3-Punkt-Biegezugversuch mittiger Lastangriff					zentrischer Druckversuch			
	Belastungsgeschw.					0,06 N/mm²s					0,6 N/mm²s			

Serie M1 (UHPC) - Festigkeiten												
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr.:		UHPC-100-5,0-24-E			Prüfdatum:		11.09.2003			11.09.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		11:30			12:15		
Probennummer	Gew.	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	F _{max}	σ _{max}	Abw.
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[%]
M1-16/1	620,3	40,3	39,8	160,0	0,257	2.417	7.559,35	17,76	1,97	376,13	150,45	0,57
										372,73	149,09	1,47
M1-16/2	623,1	41,0	39,8	160,0	0,261	2.387	7.539,66	17,41	3,90	349,75	139,90	7,54
										395,71	158,28	4,61
M1-16/3	616,1	40,4	39,9	160,0	0,258	2.389	8.225,25	19,18	5,87	378,49	151,40	0,06
										396,83	158,73	4,91
					2.397,4		f_{ctm}	18,12		f_{cm}	151,31	
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr.:		UHPC-100-6,0-24-F			Prüfdatum:		11.09.2003			11.09.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		12:00			12:45		
Probennummer	Gew.	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	F _{max}	σ _{max}	Abw.
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[%]
M1-17/1	624,4	40,2	39,8	160,0	0,256	2.439	7.061,62	16,63	1,10	367,83	147,13	1,63
										368,69	147,48	1,87
M1-17/2	623,3	40,5	39,8	160,0	0,258	2.417	7.170,91	16,77	1,90	375,34	150,14	3,71
										356,20	142,48	1,58
M1-17/3	611,3	40,7	39,8	160,0	0,259	2.359	6.859,44	15,96	3,00	342,37	136,95	5,40
										361,05	144,42	0,24
					2.404,8		f_{ctm}	16,45		f_{cm}	144,77	
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr.:		UHPC-200-5,0-24-F			Prüfdatum:		11.09.2003			11.09.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		12:45			13:30		
Probennummer	Gew.	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	F _{max}	σ _{max}	Abw.
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[%]
M1-18/1	645,6	40,0	40,0	160,0	0,256	2.522	11.370,4	26,65	25,6	426,15	170,46	4,08
										429,38	171,75	4,87
M1-18/2	648,3	41,1	39,7	160,0	0,261	2.483	8.939,47	20,70	2,4	395,81	158,32	3,33
										408,12	163,25	0,32
M1-18/3	633,3	40,1	39,9	160,0	0,256	2.474	9.250,94	21,74	2,4	391,29	156,52	4,43
										405,82	162,33	0,88
					2.492,9		f_{ctm}	21,22		f_{cm}	163,77	
Legende		d ₁	Breite Prüfkörper				f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm ²				
		d ₂	Höhe Prüfkörper				f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm ²				
		l	Länge Prüfkörper					Ausgeschiedener Wert				
Prüfverfahren							Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		Belastungsverfahren:					3-Punkt-Biegezugversuch mittiger Lastangriff			zentrischer Druckversuch		
		Belastungsgeschw.					0,06 N/mm ² s			0,6 N/mm ² s		

Serie M1 (UHPC) - Festigkeiten															
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:		UHPC-200-6,0-24-E		Prüfdatum:		11.09.2003		11.09.2003							
Probenalter:		29 Tage		Uhrzeit:		13:30		14:30							
Probennummer	Gewicht	Abmessungen			Vol. V	Dichte ρ	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]		
M1-19/1	637,65	39,8	40,0	160,0	0,255	2.503	7.260,41	17,10	4,93	2	379,70	151,88	9,02	4a	
											351,02	140,41	0,78	-	
M1-19/2	627,70	40,0	39,9	160,0	0,255	2.458	6.898,83	16,25	0,30	-	350,81	140,32	0,72	4a	
											345,62	138,25	0,77	4b	
M1-19/3	626,60	40,1	40,0	160,0	0,257	2.442	6.648,22	15,54	4,64	-	316,47	126,59	9,14	-	
											346,13	138,45	0,62	-	
							f_{ctm}	16,30			f_{cm}	139,32			
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:				Prüfdatum:											
Probenalter:				Uhrzeit:											
Probennummer	Gewicht	Abmessungen			Vol. V	Dichte ρ	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]		
							f_{ctm}				f_{cm}				
Probendaten								Biegezugprüfung				Druckprüfung			
Materialbeschr:				Prüfdatum:											
Probenalter:				Uhrzeit:											
Probennummer	Gewicht	Abmessungen			Vol. V	Dichte ρ	Biegezugprüfung				Druckprüfung				
		d ₁	d ₂	l			F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	F _{max}	σ _{max}	Abw.	An.	
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]		[kN]	[N/mm ²]	[%]		
							f_{ctm}				f_{cm}				
Legende		d ₁	Breite des Prüfkörpers				f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm ²							
		d ₂	Höhe des Prüfkörpers				f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm ²							
		l	Länge des Prüfkörpers					Ausgeschiedener Wert							
Anmerkungen (fehlerhafte Prüfkörper)		1	Lunker ausserhalb der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
		2	Lunker in der Bruchzone an der Probekörperunterseite												
		3	Lunker ausserhalb der Druckzone												
		4a	Lunker in der Druckzone am seitlichen				4b	oberen Prüfkörperand							
Prüfverfahren						Biegezugprüfung				Druckprüfung					
		Belastungsverfahren:				3-Punkt-Biegezugversuch mittiger Lastangriff				zentrischer Druckversuch					
		Belastungsgeschw.				0,06 N/mm ² s				0,6 N/mm ² s					

Serie M4 (HPC) - Festigkeiten												
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr:		HPC-4,5-10-0,35			Prüfdatum:		19.09.2003			19.09.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		10:00			10:30		
Probennummer	Gew.	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁	d ₂	l	V	ρ	F _{max}	σ _{max}	Abw.	F _{max}	σ _{max}	Abw.
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[%]
M4-01/1	618,0	40,5	40,0	160,0	0,259	2.384	5.261,06	12,18	2,45	276,95	110,78	4,51
										270,71	108,28	2,15
M4-01/2	613,9	40,2	40,0	160,0	0,257	2.386	5.601,41	13,06	4,64	262,76	105,10	0,85
										262,31	104,92	1,02
M4-01/3	622,3	40,8	39,9	160,0	0,260	2.389	5.287,93	12,21	2,18	253,17	101,27	4,47
										264,15	105,66	0,32
					2.386,5	f_{ctm}	12,48	f_{cm}	106,00			
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr:		HPC-5,0-10-0,35			Prüfdatum:		19.09.2003			19.09.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		10:45			12:15		
Probennummer	Gew.	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁	d ₂	l	V	ρ	F _{max}	σ _{max}	Abw.	F _{max}	σ _{max}	Abw.
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[%]
M4-02/1	611,9	40,1	40,0	160,0	0,257	2.384	5.081,24	11,88	7,04	245,23	98,09	5,57
										266,14	106,46	2,48
M4-02/2	629,9	40,9	39,9	160,0	0,261	2.412	4.536,57	10,45	5,83	264,47	105,79	1,84
										250,30	100,12	3,62
M4-02/3	624,7	40,8	40,0	160,0	0,261	2.392	4.771,28	10,96	1,21	256,85	102,74	1,10
										275,19	110,08	5,97
					2.396,3	f_{ctm}	11,10	f_{cm}	103,88			
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr:		HPC-5,0-10-0,37			Prüfdatum:		19.09.2003			19.09.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		12:30			12:45		
Probennummer	Gew.	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁	d ₂	l	V	ρ	F _{max}	σ _{max}	Abw.	F _{max}	σ _{max}	Abw.
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[%]
M4-03/1	628,6	40,7	40,0	160,0	0,260	2.413	4.593,06	10,58	1,86	265,19	106,08	0,20
										266,43	106,57	0,26
M4-03/2	621,2	40,4	40,0	160,0	0,259	2.402	4.417,43	10,25	4,91	271,95	108,78	2,34
										264,07	105,63	0,63
M4-03/3	619,3	39,9	39,9	160,0	0,255	2.431	4.874,41	11,51	6,77	262,09	104,84	1,37
										264,66	105,86	0,40
					2.415,6	f_{ctm}	10,78	f_{cm}	106,29			
Legende		d ₁	Breite Prüfkörper		f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm ²						
		d ₂	Höhe Prüfkörper		f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm ²						
		l	Länge Prüfkörper			Ausgeschiedener Wert						
Prüfverfahren							Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		Belastungsverfahren:					3-Punkt-Biegezugversuch mittlerer Lastangriff			zentrischer Druckversuch		
		Belastungsgeschw.					0,06 N/mm ² s			0,6 N/mm ² s		

Serie M4 (HPC) - Festigkeiten												
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr.:		HPC-5,0-20-0,35			Prüfdatum:		03.10.2003			03.10.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		9:30			10:00		
Probennummer	Gew. [g]	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]	V [dm ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]
M4-04/1	632,6	41,7	40,0	160,0	0,267	2.370	5.610,94	12,61	0,39	272,35 243,17	108,94 97,27	0,89 9,92
M4-04/2	641,8	42,2	40,0	160,0	0,270	2.376	5.781,08	12,84	1,41	279,01	111,60	3,36
										268,89	107,56	0,39
M4-04/3	637,3	42,0	39,9	160,0	0,268	2.377	5.587,66	12,54	1,02	258,97	103,59	4,06
										270,46	108,18	0,19
					2.374,5	f_{ctm}	12,66	f_{cm}	107,97			
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr.:		HPC-5,0-25-0,35			Prüfdatum:		03.10.2003			03.10.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		9:45			10:30		
Probennummer	Gew. [g]	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]	V [dm ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]
M4-05/1	627,1	41,6	40,0	160,0	0,266	2.355	6.103,44	13,75	7,00	267,31 241,86	106,92 96,74	1,13 8,50
M4-05/2	611,9	40,8	40,0	160,0	0,261	2.343	5.516,02	12,67	1,40	273,65	109,46	3,52
										276,27	110,51	4,52
M4-05/3	614,8	40,7	39,9	160,0	0,260	2.366	5.242,01	12,14	5,60	181,20	72,48	31,5
										262,58	105,03	0,66
					2.355,0	f_{ctm}	12,85	f_{cm}	105,73			
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr.:		HPC-5,0-20-0,37			Prüfdatum:		03.10.2003			03.10.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		10:15			11:15		
Probennummer	Gew. [g]	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]	V [dm ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]
M4-06/1	613,9	40,4	40,0	160,0	0,259	2.374	5.324,4	12,36	0,86	259,47	103,79	0,68
										265,49	106,20	1,63
M4-06/2	615,6	40,5	40,0	160,0	0,259	2.375	5.365,59	12,42	0,34	257,42	102,97	1,46
										260,60	104,24	0,24
M4-06/3	612,0	40,4	39,9	160,0	0,258	2.373	5.408,57	12,61	1,21	261,92	104,77	0,26
										262,50	105,00	0,48
					2.374,1	f_{ctm}	12,46	f_{cm}	104,49			
Legende		d ₁	Breite Prüfkörper			f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm ²					
		d ₂	Höhe Prüfkörper			f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm ²					
		l	Länge Prüfkörper				Ausgeschiedener Wert					
Prüfverfahren							Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		Belastungsverfahren:					3-Punkt-Biegezugversuch mittlerer Lastangriff			zentrischer Druckversuch		
		Belastungsgeschw.					0,06 N/mm ² s			0,6 N/mm ² s		

Serie M4 (HPC) - Festigkeiten												
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr:		HPC-6,0-20-0,37			Prüfdatum:		03.10.2003			03.10.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		10:30			11:45		
Probennummer	Gew. [g]	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]	V [dm ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]
M4-07/1	614,1	40,6	40,0	160,0	0,260	2.363	5.122,02	11,83	1,52	271,64	108,66	0,33
										262,93	105,17	3,52
M4-07/2	610,0	40,1	40,0	160,0	0,257	2.377	5.021,73	11,74	0,78	278,50	111,40	2,19
										278,04	111,22	2,02
M4-07/3	608,3	40,1	40,1	160,0	0,257	2.364	4.892,78	11,38	2,30	269,10	107,64	1,26
										274,96	109,98	0,89
					2.368,2		f_{ctm}	11,65		f_{cm}	109,01	
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr:		HPC-6,0-20-0,37			Prüfdatum:		03.10.2003			03.10.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		11:00			12:30		
Probennummer	Gew. [g]	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]	V [dm ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]
M4-08/1	619,7	41,0	39,9	160,0	0,262	2.368	5.639,60	12,96	0,28	283,06	113,22	2,15
										269,75	107,90	6,75
M4-08/2	633,9	41,8	40,0	160,0	0,268	2.370	5.259,92	11,80	9,23	298,49	119,40	3,19
										300,04	120,02	3,72
M4-08/3	623,3	41,1	40,0	160,0	0,263	2.370	6.239,55	14,23	9,51	282,02	112,81	2,51
										302,27	120,91	4,49
					2.368,9		f_{ctm}	13,00		f_{cm}	115,71	
Probendaten					Biegezugprüfung					Druckprüfung		
Materialbeschr:		HPC-5,0-20-0,40			Prüfdatum:		03.10.2003			03.10.2003		
Prüfer:		Jan Girzikowsky			Uhrzeit:		11:15			13:00		
Probennummer	Gew. [g]	Abmessungen			Vol.	Dichte	Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	l [mm]	V [dm ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]	F _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Abw. [%]
M4-09/1	605,9	40,1	39,9	160,0	0,256	2.367	5.698,7	13,39	4,81	292,39	116,96	0,64
										284,59	113,84	2,04
M4-09/2	604,4	40,2	40,0	160,0	0,257	2.349	5.238,43	12,22	4,38	287,11	114,84	1,17
										298,47	119,39	2,74
M4-09/3	613,9	40,3	39,8	160,0	0,257	2.392	5.413,94	12,72	0,43	291,05	116,42	0,18
										289,50	115,80	0,35
					2.369,4		f_{ctm}	12,78		f_{cm}	116,21	
Legende		d ₁	Breite Prüfkörper		f _{ctm}	mittlere Biegezugfestigkeit in N/mm ²						
		d ₂	Höhe Prüfkörper		f _{cm}	mittlere Druckfestigkeit in N/mm ²						
		l	Länge Prüfkörper			Ausgeschiedener Wert						
Prüfverfahren							Biegezugprüfung			Druckprüfung		
		Belastungsverfahren:					3-Punkt-Biegezugversuch mittlerer Lastangriff			zentrischer Druckversuch		
		Belastungsgeschw.					0,06 N/mm ² s			0,6 N/mm ² s		