

Einfluss von Kunststofffasern auf die Eigenschaften von Schaumbeton

Student Paper

Author(s):

Bucher, André; Yao, Yi

Publication date:

2006

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005287179>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)



Einfluss von Kunststofffasern auf die Eigenschaften von Schaumbeton

Professor: Prof. Dr. Jan G.M. van Mier
Betreuer: Dominik Meyer

Studenten: André Bucher, Yi Yao

Bachelorarbeit,
Studiengang Bauingenieurwissenschaften

Juli 2006

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IfB

Institut für Baustoffe
Institute for Building Materials

Dank

Dieser Bericht ist das Resultat unserer Bachelorarbeit im Sommersemester 2006 am Institut für Baustoffe an der ETH Zürich.

Die Arbeit war sehr interessant und lehrreich. Sie ermöglichte uns einen Einblick in die praktische wie auch theoretische Forschung des IfB.

Unser Dank gilt Prof. Dr. Jan G. M. van Mier, unter dessen Leitung diese Arbeit durchgeführt wurde.

Ein spezieller Dank geht an Dominik Meyer, der uns bei dieser Arbeit tatkräftig unterstützte und betreute.

Ebenso wollen wir uns bei Heinz Richner und dem ganzen Lehrstuhl Bruchmechanik von Beton bedanken.

André Bucher, Yi Yao

Zürich im Juli 2006

Bachelorarbeit Studiengang Bauingenieurwissenschaften

Einfluss von Kunststofffasern auf die Eigenschaften von Schaumbeton

Bucher André
D-BAUG

E-Mail-Adresse: buchera@student.ethz.ch

Yao Yi
D-BAUG

E-Mail-Adresse: yyao@student.ethz.ch

Juli 2006

Kurzfassung

Die Ziele dieser Arbeit lagen einerseits in der Ermittlung der Mischbarkeit von einzelnen Faserlängen mit Schaumzementleim, andererseits in der Untersuchung des Einflusses der Fasern auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von Schaumzementleim.

Am Beginn der Arbeit standen ein kurzes Literaturstudium und die Erarbeitung des Terminprogramms. Als Erste der praktischen Arbeiten wurden durch Vorversuche geeignete Mischungen gesucht, welche die Kriterien der Mischbarkeit erfüllten. Die dadurch erhaltenen Rezepturen fanden dann in den Hauptversuchen Anwendung, um die rheologischen Eigenschaften zu bestimmen und Probekörper herzustellen. An diesen wurden nach 28 Tagen die mechanischen Eigenschaften mittels 3-Punktbiegezugprüfung und Druckprüfung bestimmt.

Bezüglich der Rheologie ging aus den Versuchen hervor, dass das Fließverhalten durch die Fasern leicht verschlechtert wird. Aus den mechanischen Versuchen kann festgehalten werden, dass bei der Druckfestigkeit die Residualfestigkeit im Verhältnis zur Maximalkraft grösser wird und beim Biegezugversuch sowohl die Festigkeit als auch die Duktilität erhöht wird. Auf die Wärmedurchgangsfähigkeit haben die Fasern keinen eindeutigen Einfluss.

Stichworte

Kunststofffasern; Schaumbeton; Rheologie; mechanische Eigenschaften

Inhaltsverzeichnis

1	Zieldefinition.....	1
2	Einleitung.....	2
3	Grundlagen.....	3
3.1	Beton.....	3
3.2	Faserverstärkter Beton.....	3
3.2.1	Fasern.....	4
3.3	Leichtbeton.....	5
3.3.1	Schaum.....	5
3.4	Rheologie.....	5
3.5	Hydraulik.....	6
4	Vorversuche.....	7
5	Hauptversuche.....	13
5.1	Frischbetonkontrollen und Probekörper.....	13
5.1.1	Arbeitsschritte.....	15
5.1.2	Mischvorgang.....	18
5.1.3	Frischbetonkontrollen.....	19
5.1.4	Betonieren der Probekörper.....	19
5.2	Lagerung und Probenvorbereitung.....	21
5.2.1	Ausschalung und Lagerung.....	21
5.2.2	Probenvorbereitung.....	22
5.3	Mechanische Prüfung.....	23
5.3.1	Prüfmaschinen.....	23
5.3.2	Druckprüfung an stehende Prismen 5x5x14 cm.....	24
5.3.3	3-Punktbiegezugveruch an Prismen 5x5x20 cm.....	25
5.3.4	Druckprüfung an liegenden Prismen 5x5x20 cm.....	26
5.4	Wärmedurchgangszahl λ	27
5.5	Auswertung.....	28
6	Resultate.....	29

6.1	Vorversuche.....	29
6.1.1	Rheologie	29
6.1.2	Maximaler Faseranteil	31
6.2	Drainagemessung.....	31
6.3	Hauptversuche.....	33
6.3.1	Rheologie	33
6.3.2	Druckversuch an stehenden Prismenproben	36
6.3.3	3-Punktbiegezugversuch an liegenden Prismenproben.....	38
6.3.4	Druckversuch an liegenden Prismenproben aus dem 3-Punktbiegezugversuch	41
6.4	Wärmedurchgangsmessung.....	43
7	Diskussion	44
7.1	Einfluss auf rheologische Eigenschaften.....	44
7.2	Einfluss auf mechanische Eigenschaften.....	44
7.2.1	Einfluss auf Druckfestigkeit	44
7.2.2	Einfluss auf Biegezugfestigkeit.....	45
7.3	Einfluss auf die Wärmedurchgangsfähigkeit	45
8	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	46
9	Literatur.....	47
10	Tabellenverzeichnis	48
11	Abbildungsverzeichnis	49

1 Zieldefinition

Das Ziel dieser experimentalen Arbeit war einerseits die Untersuchung der Mischbarkeit von einzelnen Faserlängen mit Schaumzementleim, andererseits die Ermittlung der Auswirkungen von verschiedenen Faserlängen auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von Schaumzementleim.

2 Einleitung

Schaumbeton weist im Vergleich zu konventionellem Beton den grossen Vorteil auf, dass sein spezifisches Gewicht deutlich geringer ist. Dem gegenüber steht jedoch der Nachteil der geringeren Festigkeit. Um diesem Nachteil entgegenzuwirken, können Fasern in den Schaumbeton eingemischt werden.

Die Arbeit kann in einen praktischen und analytischen Teil gegliedert werden. Während bei der praktischen Arbeit die Mischungen hergestellt und auf ihre rheologischen Eigenschaften hin untersucht bzw. die daraus hergestellten Proben einer mechanischen und thermischen Prüfung unterzogen wurden, stand beim analytischen Teil die Aufarbeitung der erhaltenen Daten und deren Auswertung im Vordergrund.

Um mögliche Abhängigkeiten zwischen der Faserlänge und den rheologischen bzw. mechanischen Eigenschaften ausmachen zu können, wurden Proben mit Fasern der Längen 3 mm, 12 mm und 24 mm hergestellt, welche untereinander und mit Referenzproben verglichen wurden.

Bei der Untersuchung der Mischbarkeit wurde darauf geachtet, dass es beim Mischen zu keiner Klumpenbildung oder Segregation der Fasern kam. Für die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften wurden die Fliesseigenschaften untersucht. Dabei wurde das Fliessverhalten auf Grund des kleinen Ausbreitmasses, der SegBox und der U-Schalung bestimmt. Bei der mechanischen Prüfung wurden die Proben durch einen 3-Punktbiegezugversuch bzw. Druckversuch auf ihre mechanischen Eigenschaften hin untersucht. Anschliessend wurde der Wärmedurchgangskoeffizient bestimmt.

3 Grundlagen

3.1 Beton

Beton ist ein Gemisch aus Wasser, Zement und Zuschlag. Dabei wirkt der Zement als Bindemittel, während der Zuschlag (Kies und Sand) als Füllstoff dient. Zu diesen drei Hauptkomponenten können noch Zusatzstoffe und Zusatzmittel hinzugefügt werden, um die Eigenschaften des Betons zu verändern. Konventioneller Beton zeichnet sich vor allem durch seine grosse Druckfestigkeit aus, während die Nachteile in der geringen Zugfestigkeit, im spröden Versagensverhalten und dem hohen spezifischen Gewicht liegen.

Deshalb wurde zum Einen mit faserverstärktem Beton versucht, die Zugfestigkeit zu erhöhen und ein duktileres Versagensverhalten zu erreichen. Andererseits kann durch den Einsatz von Leichtbetonen das Gewicht des Betons verringert werden. Dies führt jedoch zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften.

3.2 Faserverstärkter Beton

Mit Hilfe von Fasern (in der Regel aus Glas-, Kunststoff-, Stahl, Natur- und Kohlenfasern) können die entstehenden Risse in der Betonmatrix überbrückt und somit auch die Kraft übertragen werden, sofern die Fasern in der Hauptbelastungsrichtung ausgerichtet sind. Zudem wird die Geschwindigkeit der Rissaufweitung gedrosselt. Anstelle einzelner weniger, grosse Risse treten viele nebeneinander liegender, kleine Risse auf (multiple cracking).

Erste Pionierarbeiten auf dem Gebiet der faserverstärkten Betone wurden in den 1960er Jahren geleistet, jedoch ohne grosse Anwendung zu finden. In den 1970er Jahren wurde durch die Erhöhung des W/Z-Wertes der Einsatz von selbstverdichtendem Beton (SCC) lanciert, jedoch musste zu dieser Zeit ein Qualitätsverlust des Betons in Kauf genommen werden, da noch überschüssiges Wasser nach der Zementhydratation im Beton vorhanden war. Dieser Qualitätsverlust konnte erst mit dem Einsatz von Fließmittel kompensiert werden, wodurch der W/Z-Wert wieder gesenkt werden konnte. Erst in den letzten paar Jahren konnte die Herstellung des faserverstärkten Beton soweit verfeinert werden, dass praktische Anwendungen möglich wurden. Neben dem SCC entwickelten sich in den letzten Jahren auch die hybr-

den Faserbetone (HFC), welche sich dadurch kennzeichnen, dass verschiedene Fasernlängen in einer Mischung verwendet werden.

Der faserverstärkte Beton sollte selbstverdichtend sein, da bei einem allfälligen Vibrieren die Gefahr besteht, dass die Fasern absinken und so die „homogene“ Verteilung der Fasern verloren geht (Segregation).

Die Vorteile des faserverstärkten Betons liegen in den mechanischen Eigenschaften und der grossen Homogenität des Betons, aber auch in einer hohen Dichte der Betonmatrix, welche zu einer guten Dauerhaftigkeit führt. Neben den Vorteilen müssen jedoch auch die Nachteile, wie der sehr hohe Preis (bis zu 2000 Fr./m³) und die Empfindlichkeit bei der Herstellung (Abwägefehler, Mischzeiten) erwähnt werden.

3.2.1 Fasern¹

Bei den verwendeten Kunststofffasern handelt es sich um Polyvinylalkohol-Fasern (PVA-Fasern). Die PVA-Fasern werden durch das Verspinnen von Polyvinylalkohol-Lösungen ins Fällbad oder in den Heissluftschacht erzeugt. Anschliessend werden sie mit Aldehyden vernetzt und unlöslich gemacht.

Die PVA-Fasern besitzen eine gute Scheuerfestigkeit, sie sind jedoch knitterempfindlich.

Tabelle 3.1: Eigenschaften der PVA-Fasern

Spezifisches Gewicht	Feuchtigkeitsaufnahme	Schmelzbereich	Reissfestigkeit	Reissdehnung	Relative Nassfestigkeit
1.26 - 1.30	5%	232 – 238°C	2.2 – 3.6 p/dtex	20 – 25%	77 – 83%

¹ H. Beck (1979); Kunststoff Lexikon; 5. Auflage; Carl Hanser Verlag

3.3 Leichtbeton

Der grosse Vorteil von Leichtbeton gegenüber konventionellem Beton liegt in seiner geringeren Dichte und den damit verbundenen guten Isolationseigenschaften. Das geringere spezifische Gewicht des Leichtbetons kann auf zwei verschiedene Arten erreicht werden. Einerseits kann durch die Anwendung von leichten Zuschlägen das Gewicht reduziert werden. Andererseits senkt das Einbringen einer porösen Matrix die Dichte. Die poröse Matrix kann zum Beispiel durch den Einsatz von Schaum erzeugt werden. Dem gegenüber steht natürlich die, durch die grosse Porosität verursachte, geringere Festigkeit.

3.3.1 Schaum

Der verwendete Schaum ist ein Gemisch aus Luft, Wasser und einem Schaumbildner auf Proteinbasis. Hergestellt wird der Schaum mit speziellen Schaumgeneratoren. Am IfB steht dazu ein Membran-Schaumgenerator zur Verfügung.

3.4 Rheologie

Die rheologischen Eigenschaften des Betons hängen primär von der Betonrezeptur ab. Das Fliessverhalten wird direkt durch den W/Z-Wert, den Fliessmittelgehalt, die Kornverteilung, die Faserlängen, den Fasergehalt und den zugegebenen Schaum beeinflusst.

Ab einem Ausbreitmass von 17 cm (gemessen mit dem kleinen Ausbreitmass) kann eine Mischung als selbstverdichtend bezeichnet werden.

3.5 Hydraulik

Frischbeton lässt sich durch die Gesetze der Bingham'schen Flüssigkeitstheorie beschreiben: wird die Grenzschubspannung unterschritten, so verhält sich das Medium wie ein elastischer Körper. Liegt die Schubspannung hingegen oberhalb der Grenzschubspannung, so liegt eine Flüssigkeit vor, die sich nach den Gesetzen der Newton'schen Flüssigkeitstheorie verhält.

In Rohrströmungen ist das Geschwindigkeitsprofil so ausgebildet, dass im Zentrum des Querschnittes die grössten Geschwindigkeiten herrschen und diese gegen den Rand hin abnehmen (gegen null streben). Der Geschwindigkeitsgradient ist jedoch nicht konstant, sondern er nimmt gegen das Zentrum hin ab. Die Form des Geschwindigkeitsprofils weist eine Abhängigkeit mit den Fliesseigenschaften und den Fließgeschwindigkeiten des Mediums auf.

4 Vorversuche

Mit den ersten Vorversuchen sollten einerseits erste Erfahrungen mit der Herstellung von Schaumfaserbeton gesammelt werden, andererseits sollte eine Entscheidung getroffen werden, mit welchem Schaumgehalt (40% oder 60%) die weiteren Versuche durchgeführt werden. Dazu wurde der Zement Normo 5R (Holcim, Siggenthal) und der Fasertyp Kuravay RF 350 verwendet.

Tabelle 4.1: Eigenschaften des Kunststofffasertyps Kururay RF 350

Durchmesser [μm]	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [MPa]	Dosierung (Richtwerte) [kg/m^3]
200	1000	30000	20-30

Für die Durchführung der ersten Vorversuche wurde ein Ablaufschema erstellt, damit ein einheitlicher Herstellungsablauf (Minimierung des Einflusses externer Faktoren wie z.B. der Mischdauer) gewährleistet werden konnte und so die einzelnen Mischungen auch miteinander verglichen werden konnten.

Ablaufschema:

1) Komponenten abwiegen / Schaum generieren

2) Zementleim mischen, bis Mischung homogen ist

3) Fasern einmischen, bis Mischung homogen ist

4) Schaum untermischen, bis Mischung homogen ist

5) Kleines Ausbreitmass

6) Probekörper (1 Prisma 12x12x36 cm) giessen

Abbildung 4.1: kleines Ausbreitmass



Der Schaum wurde mit dem Membran-Schaumgenerator hergestellt mit einer Proteinkonzentration von 50 g/l und einer Zielschaumdichte von 80 g/l. Bei der Herstellung des Schaums musste darauf geachtet werden, dass man den Generator etwa 10 s vor bzw. nach der Entnahme laufen liess, um den Schaum für die Mischung zu entnehmen, da der generierte Schaum am Anfang bzw. am Schluss der Herstellung durch den Start- bzw. Endprozess nicht die der Einstellung entsprechenden Dichte aufweist.

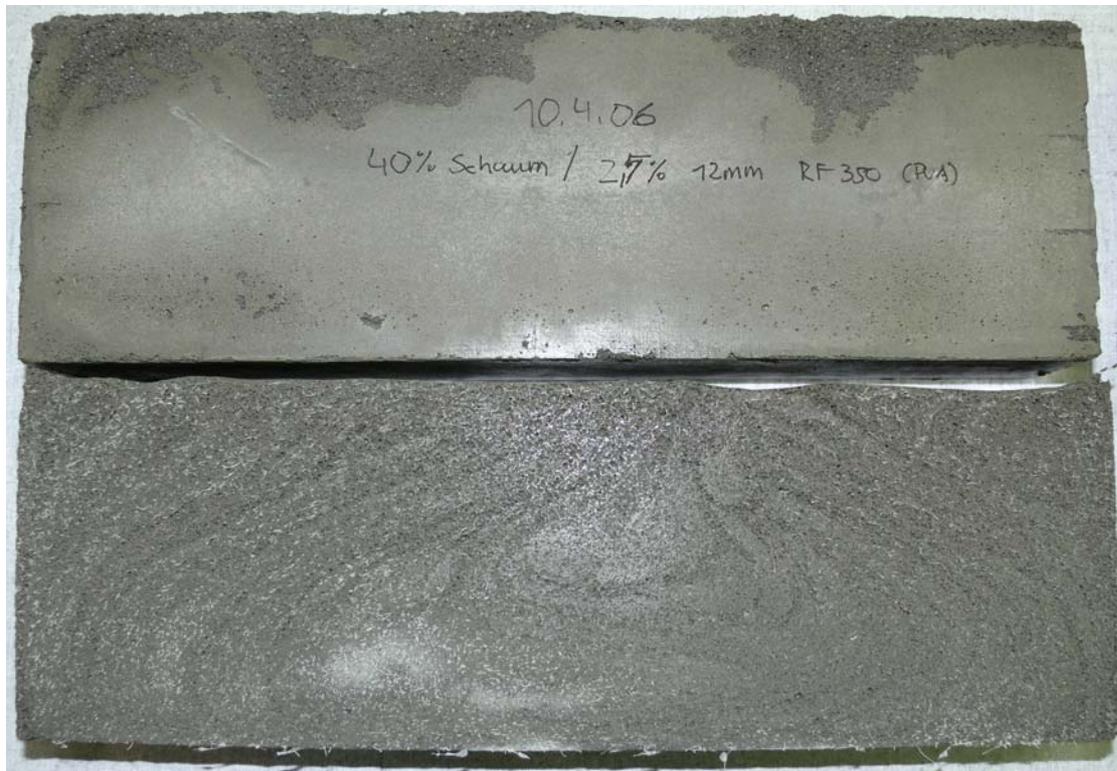
Für jede Mischung wurde jeweils ein Volumen von 8 Litern von Hand hergestellt, d.h. unter dem Einsatz einer Bohrmaschine mit einem Durchmischungsaufsatz. Bei der Faserlänge beschränkten wir uns für die ersten Vorversuche auf die 12 mm langen Fasern.

Tabelle 4.2: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen der ersten Vorversuche

Faserlänge 12 mm	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
Schaumgehalt [% / kg]	60 / 0.38	40 / 0.25	40 / 0.25	40 / 0.25
Schaumdichte [g/l]	80.29	80.29	80.29	80.29
Fasergehalt [% / kg]	1.5 / 0.13	1.5 / 0.13	2 / 0.18	2.5 / 0.22
W/Z (ohne Schaum)	0.40	0.40	0.40	0.40
End-W/Z	0.49	0.44	0.44	0.44
Zement [kg]	4.36	6.82	6.81	6.81
Wasser [kg]	1.75	2.73	2.73	2.73
Ausbreitmass [cm]	16	18	17.5	16.5

Zwei Tage nach der Herstellung wurden die Proben aufgeschnitten und begutachtet. Dabei zeigte sich, dass die Schaumstruktur nicht homogen ist. Als Konsequenz daraus wurde das Ablaufschema angepasst: der Schaum wird erst nach dem Einmischen der Fasern generiert und dann dem Zementleim untergemischt, damit der Schaum frisch ist.

Abbildung 4.2: aufgeschnittener Probekörper



Nach den ersten Vorversuchen wurde der Schaumgehalt für die weiteren Untersuchungen mit 40% festgelegt.

Das Ziel der weiteren Vorversuche lag darin, den maximalen Fasergehalt für die drei Mischungen mit 3 mm, 12 mm bzw. 24 mm langen Fasern zu ermitteln, damit es bei der Herstellung zu keiner Segregation kommt.

Der End-W/Z-Wert (inkl. Schaum) wurde mit 0.44 festgelegt, um eine gute Verarbeitbarkeit zu erreichen.

Die Herstellung der Mischungen erfolgte ebenfalls von Hand, wie bei den ersten Vorversuchen, jedoch wurde ein Volumen von 8.5 l hergestellt.

Das Ablaufschema¹ wurde entsprechend den Erkenntnissen aus den ersten Vorversuchen angepasst.

Tabelle 4.3: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen des Vorversuches mit 12 mm langen Fasern

Faserlänge 12 mm	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3
Schaumgehalt [% / kg]	40 / 0.26	40 / 0.26	40 / 0.26
Schaumdichte [g/l]	77.37	77.37	77.37
Fasergehalt [% / kg]	1.5 / 0.17	2 / 0.22	2.5 / 0.28
W/Z (ohne Schaum)	0.40	0.40	0.40
End-W/Z	0.44	0.44	0.44
Zement [kg]	6.9	6.85	6.79
Wasser [kg]	2.77	2.75	2.72
Dichte [kg/m ³]	1188.91	1185.92	1182.93
Ausbreitmass [cm]	16.5	16.5	15

¹ vgl. Ablaufschema S.7

Bei den 12 mm-Mischungen mit 2% und 2.5% Fasergehalt war das Mischen von einer homogenen Mischung vor der Schaumzugabe kaum zu bewerkstelligen, denn es kam zur Klumpenbildung. Nach der Schaumzugabe erhöhte sich jedoch die Mischbarkeit wieder. Fünf Tage nach der Herstellung wurden die Proben ebenfalls halbiert, um die Durchmischung zu untersuchen. Dabei wurden die Eindrücke aus der Herstellung und dem Einbringen der Mischung in die Schalung, sowie aus den rheologischen Tests bestätigt, dass es bei Mischung 3 (2.5%) zur Bildung von Klumpen gekommen ist, was ein Indiz für die Überschreitung des maximal mischbaren Fasergehalts darstellt. Somit kann der Fasergehalt von 2% (Mischung 2) als Grenze der Mischbarkeit angesehen werden. Die Daten über den Vorversuch mit 12 mm langen Fasern sind der Tabelle 4.3: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen des Vorversuches zu entnehmen.

Tabelle 4.4: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen des Vorversuches mit 3 mm langen Fasern

Faserlänge 3 mm	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
Schaumgehalt [% / kg]	40 / 0.27	40 / 0.27	40 / 0.27	40 / 0.27
Schaumdichte [g/l]	79.85	79.85	79.85	79.85
Fasergehalt [% / kg]	3 / 0.33	5 / 0.55	6 / 0.66	7 / 0.77
W/Z (ohne Schaum)	0.40	0.40	0.40	0.40
End-W/Z	0.44	0.44	0.44	0.44
Zement [kg]	6.75	6.52	6.41	6.3
Wasser [kg]	2.7	2.6	2.55	2.5
Dichte [kg/m ³]	1181.82	1169.85	1163.86	1157.88
Ausbreitmass [cm]	19	16.5	16	16

Bei den Vorversuchen mit 3 mm langen Fasern wurde der maximale Fasergehalt nicht durch die Mischbarkeit des Schaumfaserzementleims begrenzt, sondern durch die Mischbarkeit des Faserzementleims, da es bei 7% Fasergehalt kaum mehr mischbar war. Somit wurde die Grenze von 6% Fasergehalt für 3 mm lange Fasern

gefunden, obwohl davon auszugehen ist, dass die Mischbarkeit des Schaumfaserzementleims für höhere Fasergehalte dennoch vorhanden ist. Die Daten über den Vorversuch mit 3 mm langen Fasern sind der Tabelle 4.4: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen des Vorversuches zu entnehmen.

Tabelle 4.5: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen des Vorversuches mit 24 mm langen Fasern

Faserlänge 24 mm	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3
Schaumgehalt [% / kg]	40 / 0.27	40 / 0.27	40 / 0.27
Schaumdichte [g/l]	79.85	79.85	79.85
Fasergehalt [% / kg]	0.4 / 0.04	0.8 / 0.09	1 / 0.11
W/Z (ohne Schaum)	0.40	0.40	0.40
End-W/Z	0.44	0.44	0.44
Zement [kg]	7.04	6.99	6.97
Wasser [kg]	2.82	2.81	2.8
Dichte [kg/m ³]	1197.38	1194.99	1193.79
Ausbreitmass [cm]	16	15.5	15

Mit 24 mm langen Fasern war der Faseranteil von 1.5% deutlich zu hoch angesetzt, sodass die Mischung kaum gemischt werden konnte. Bei einem Fasergehalt von 0.8% war die Mischbarkeit gerade noch gewährleistet und konnte somit als maximaler Fasergehalt festgelegt werden. Die Daten über den Vorversuch mit 24 mm langen Fasern sind der Tabelle 4.5 zu entnehmen.

Die detaillierten Angaben zu den Vorversuchen sind im Anhang B zu finden.

5 Hauptversuche

5.1 Frischbetonkontrollen und Probekörper

Bei den Hauptversuchen wurde je Faserlänge neben der Mischung mit dem maximalen Fasergehalt noch eine Rezeptur mit dem halben Anteil des maximalen Fasergehalts hergestellt. Somit gab es bei jedem der drei Hauptversuche (3 mm, 12 mm bzw. 24 mm Faserlänge) zwei Mischungen unterschiedlichen Fasergehalts. Zusätzlich wurden noch zwei Referenzmischungen ohne Fasern hergestellt. Die erste Referenz hatte einen Schaumgehalt von 0%, die Zweite einen von 40%. Eine Übersicht über die Mischungen ist in Tabelle 5.1: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen der Hauptversuche zu sehen. Die detaillierten Daten können dem Anhang D entnommen werden.

Tabelle 5.1: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen der Hauptversuche

	Referenz- Mischung 1	Referenz- Mischung 2	Mischung 1 1.HV (12mm)	Mischung 2 1.HV (12mm)	Mischung 1 2.HV (24mm)	Mischung 2 2.HV (24mm)	Mischung 1 3.HV (3mm)	Mischung 2 3.HV (3mm)
Schaumgehalt [% / kg]	0 / 0	40 / 1.19	40 / 1.21	40 / 1.19	40 / 1.21	40 / 1.21	40 / 1.2	40 / 1.2
Schaumdichte [g/l]	-	78.18	79.56	78.18	79.64	79.64	78.66	78.66
Fasergehalt [% / kg]	0 / 0	0 / 0	2 / 0.99	1 / 0.49	0.8 / 0.4	0.4 / 0.2	6 / 2.96	3 / 1.48
W/Z (ohne Schaum)	0.44	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
End-W/Z	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
Zement [kg]	50.1	31.62	30.65	31.13	31.26	31.46	28.63	30.13
Wasser [kg]	22.04	12.73	12.28	12.51	12.54	12.63	11.4	12.06
Dichte [kg/m ³]	1898.56	1198.50	1187.58	1192.52	1194.82	1197.22	1162.95	1180.91

5.1.1 Arbeitsschritte

Für jede Mischung wurden in der angeordneten Reihenfolge folgende Frischbetonkontrollen durchgeführt und Probekörper hergestellt:

- 1) Drainagetest für Reproduzierbarkeit des Schaums am Beginn und am Ende der Mischungsserie bzw. des Tages
- 2) 1 Kleines Ausbreitmass (0.5 Liter) für Untersuchung des Fließverhaltens
- 3) Dichte bestimmen mit dem grossen Luftporentopf¹ (8 Liter)
- 4) 10 Prismen 5x5x20 cm (10 x 0.5 Liter = 5 Liter) für mechanische Prüfungen
- 5) 1 Würfel 15x15x15 cm (3.5 Liter) für Wärmedurchgangsmessung
- 6) 1 SegBox (6 Liter) für Untersuchung des Fließverhaltens (Nivellierverhalten)
- 7) 1 U-Schalung (8 Liter) für Untersuchung des Fließverhaltens
- 8) Drainagetest für Reproduzierbarkeit des Schaums

Somit musste für jede Mischung eine Menge von 31 Litern hergestellt werden, um jedoch genügend Reserven zu haben, wurden jeweils 38 Liter produziert.

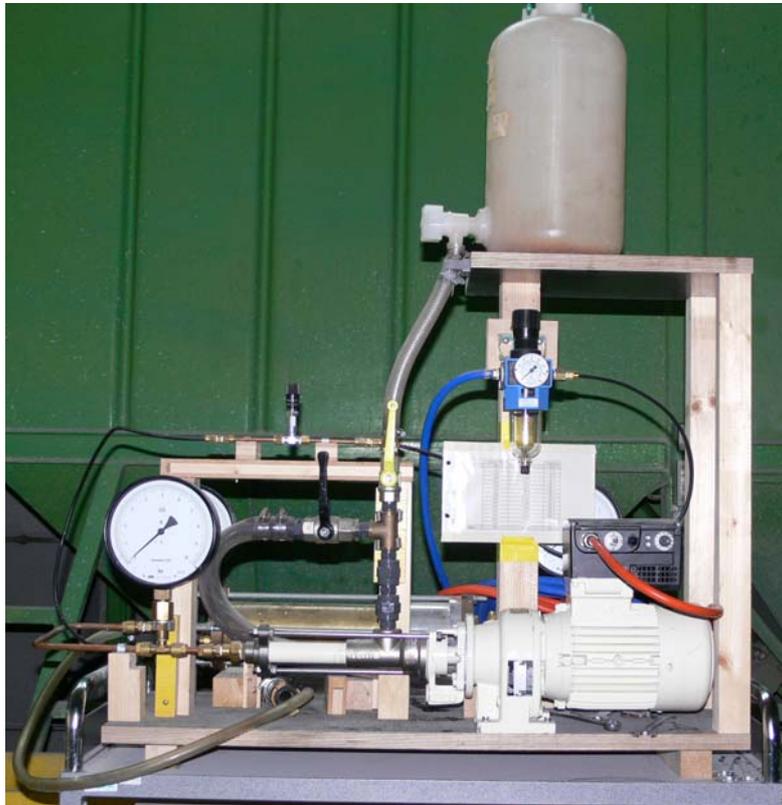
Drainagetest

Vor bzw. nach der Herstellung der Mischungen wurde jeweils ein Drainagetest durchgeführt, um die Schaumreproduzierbarkeit zu kontrollieren.²

¹ Der Luftporengehalt wurde nur bei der Referenz ohne Schaum bestimmt. Bei den anderen Mischungen wurde der Luftporengehalt nicht bestimmt, da bei diesen hohen Porengehalten keine genauen Ergebnisse erwartet werden konnten.

² vgl. 6.2 Drainagemessung

Abbildung 5.1: Schaumgenerator



Ausbreitmass

Bei der Messung des Ausbreitmasses wurde der Kegelstumpf auf eine trockene Glasplatte gelegt und mit der Mischung gefüllt. Danach wurde der Kegelstumpf senkrecht und gleichmässig nach oben bewegt.

Dichte

Der gefüllte Luftporentopf wurde gewogen und da sowohl sein Leergewicht wie auch sein Volumen bekannt waren, konnte die Frischbetondichte ausgerechnet werden. Diese gemessene Dichte wurde dann mit den berechneten Soll-Dichten verglichen.

5x5x20 Prismen

Fünf der jeweils 10 Prismen wurden für den Druckversuch mit stehenden Prismen verwendet, um die Druckfestigkeit zu ermitteln. Dabei wurden sie auf eine Höhe von 14 cm zugeschnitten und zusätzlich wurden die zu belastenden Flächen planparallel geschliffen. Die anderen fünf Prismen wurden zuerst einem 3-Punktbiegzugversuch unterworfen, um die Biegezugfestigkeit zu erhalten und anschliessend wurde mit den

nicht beschädigten Randzonen noch ein Druckversuch an liegenden Prismen durchgeführt, um noch mehr Daten für die Druckfestigkeit zu erhalten. Hier muss jedoch beachtet werden, dass beim Druckversuch mit liegenden Prismen höhere Druckfestigkeiten erreicht werden, da hier der Einfluss der Querdehnungsbehinderung grösser ist.

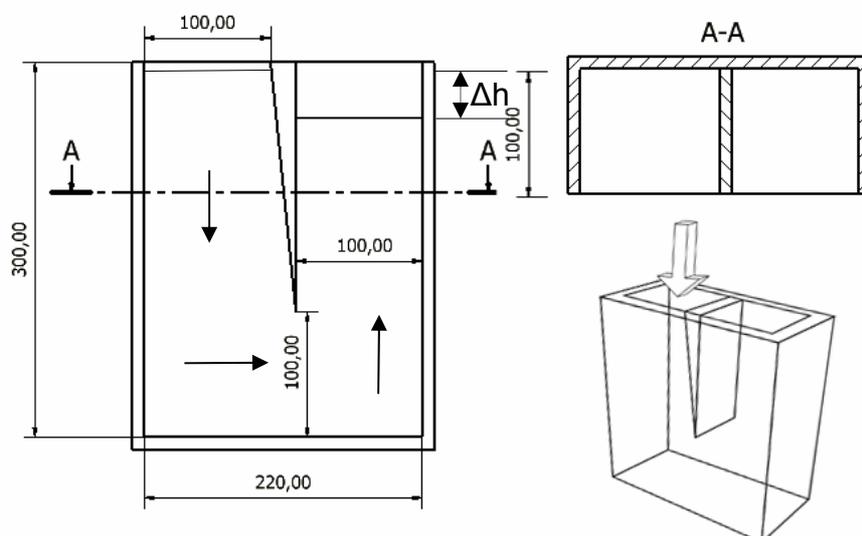
15x15x15 Würfel

Für die Wärmedurchgangsmessung wurde der Würfel in der Mitte aufgeschnitten.

SegBox

Durch die spezielle Form der SegBox kann das Fliess- und Selbstnivellierverhalten einer Mischung analysiert werden. Das Medium wird auf der einen Seite eingefüllt, umfließt dann den Metallkeil und steigt dann auf der anderen Seite wieder empor, von wo aus die Distanz zur Oberkante der Segbox gemessen wird.¹ Dabei ist zu beachten, dass nach der Ausführung die SegBox keinen unnötigen Bewegungen ausgesetzt wird, da sonst ein nachträgliches Ausnivellieren stattfinden könnte.

Abbildung 5.2: SegBox

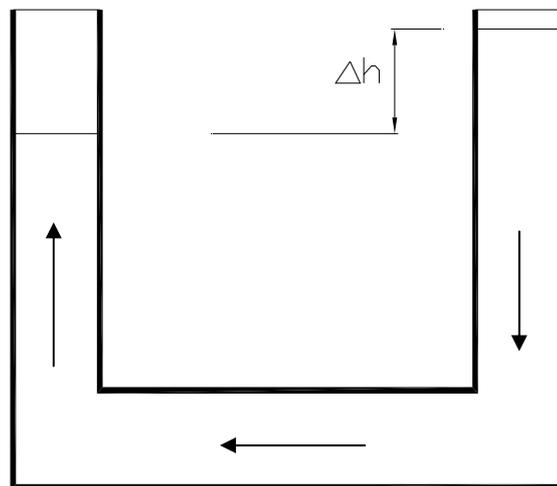
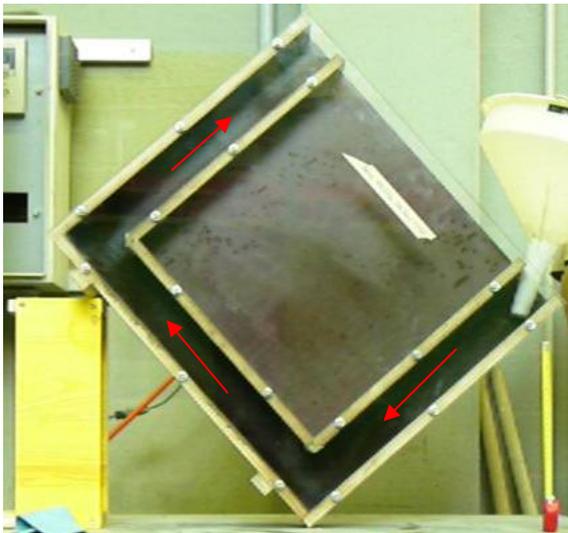


¹ vgl. 6.3.1 Rheologie

U-Schalung

Mit der U-Schalung wurde ebenfalls das Frischbetonverhalten in Bezug auf Fliesen und Selbstnivellieren betrachtet. Zusätzlich kann der Einfluss der Fließrichtung auf die Faserverteilung und die Faserausrichtung erfasst werden. Dies ist jedoch nicht mehr Teil dieser Arbeit. Das Medium wird auf der einen Seite eingefüllt, fließt dann zuerst vertikal nach unten bis zur Ecke, anschliessend horizontal bis zur nächsten Ecke und steigt dann wieder vertikal nach oben, von wo aus ebenfalls die Distanz bis zur Oberkante der U-Schalung gemessen wird.¹ Die U-Schalung wurde beim Einfüllen um 45° schräg gestellt, damit das Material nicht hineinfällt, sondern hineinfliesst.²

Abbildung 5.3: U-Schalung (links: mit Stütze)



5.1.2 Mischvorgang

Der Mischvorgang folgte dem Ablaufschema³ der Vorversuche, mit dem Unterschied, dass zum Mischen ein Zwangsmischer (Typ Colomat) eingesetzt wurde. Dabei wurde dem abgewogenen Wasser unter Unterbrechung des Mischvorganges der Zement

¹ vgl. 6.3.1 Rheologie

² vgl. Abbildung 5.3: U-Schalung (links: mit Stütze)

³ vgl. Ablaufschema S.7

zugegeben und danach wurden unter stetem Mischen kontinuierlich die Fasern hinzugefügt. Gleichzeitig wurde der Schaum generiert. Anschliessend wurde der Faserzementleimcocktail in den Freifallmischer gefüllt, gefolgt vom Schaum und der Mischungsvorgang wurde gestartet. Der Freifallmischer wurde modifiziert, um die Durchmischung bei Schaumbetonen zu verbessern.

Abbildung 5.4: Mischer



Zwangsmischer (Typ Colomat)



Freifallmischer

5.1.3 Frischbetonkontrollen

Nach der Herstellung einer Mischung wurden sofort die rheologischen Prüfungen (kleines Ausbreitmass, Frischbetondichte) durchgeführt.

5.1.4 Betonieren der Probekörper

Nach den rheologischen Tests wurden die Probekörper betoniert. Die Prismen und der Würfel wurden direkt auf einer Palette betoniert. Die SegBox und die U-Schalung wurden hingegen auf einem Tisch gefüllt, damit der Einfüllvorgang und der Fliessprozess digital festgehalten werden konnten. Anschliessend wurden die Schalungen so vorsichtig wie möglich auf die Palette gestellt, um die Erschütterungen so gering wie möglich zu halten. Damit sollte das Risiko des Verfälschens des Messergebnisses (Nivellierunterschied) minimiert werden.

Abbildung 5.5: SegBox und U-Schalung



SegBox



U-Schalung

Für die U-Schalung wurde aus Holz eine Stütze hergestellt, damit die U-Schalung beim Einfüllen schief gestellt werden kann¹. So kann vermieden werden, dass das Medium in den horizontalen Ast der U-Schalung hineinfällt, sondern hinein fließt. Dadurch kann eine Neuausrichtung der Fasern beim Aufprall vermieden werden und die Faserausrichtung wird durch die längere Fließstrecke verbessert.

Bei der Mischung 1 des 3. Hauptversuches (6% 3 mm) ergaben sich nach dem Füllen der SegBox sowie der U-Schalung Probleme, da die Schalungen nicht dicht waren und der Zementleim unten hinauslief. Deshalb mussten 12 Liter dieser Mischung nachgemischt werden und die U-Schalung wurde nochmals gegossen. Als mögliche Gründe für diese Undichtheit können einerseits eine ungenügende Befestigung der Schrauben und andererseits eine Verformung der Schalungskanten angegeben werden.

¹ vgl. Abbildung 5.3: U-Schalung (links: mit Stütze)

5.2 Lagerung und Probenvorbereitung

5.2.1 Ausschalung und Lagerung

Nach dem Aussteifen des Betons bei Raumklima (ein Tag) wurden die Probekörper ausgeschalt und anschliessend wurden sie im Feuchtraum gelagert. Dort herrscht ein konstantes Klima von 20°C und 95% relativer Luftfeuchte vor. Die Proben wurden dort während der ganzen Zeit bis zur ihrer mechanischen Prüfung (nach 28 Tagen) gelagert, ausgenommen während der Zeit der Probenvorbereitung.

Abbildung 5.6: Probenlagerung im Feuchtraum



Die Würfel, welche für die Wärmedurchgangsmessungen verwendet wurden, lagerten vor der Messung mindestens eine Woche im Raum der Wärmedurchgangsprüfung, um die Proben zu akklimatisieren. In diesem Raum herrscht ein Klima von 20°C und ca. 40% relativer Luftfeuchte vor.

5.2.2 Probenvorbereitung

Je nach Art und Zweck der Probekörper mussten diese unterschiedlich präpariert werden. Bei den Prismen musste die Einfüllseite plan geschliffen werden. Die jeweils fünf Prismen, die für den Druckversuch mit stehenden Prismen vorgesehen waren, wurden auf eine Höhe von 14 cm zugeschnitten und anschliessend wurden die zu belastenden Flächen planparallel geschliffen. Der SegBox-Körper wurde lediglich halbiert. Beim U-Schalungskörper wurden einerseits die Ecken ausgeschnitten und diese wurden wiederum longitudinal aufgeschnitten, um die Faserverteilung bzw. die Faserausrichtung ansehen zu können.

Abbildung 5.7: Maschinen der Probenvorbereitung



Schneidmaschine



Schleifmaschine

5.3 Mechanische Prüfung

Die mechanische Prüfung fand jeweils 28 Tage nach der Herstellung der Probekörper statt. Getestet wurde einerseits die Biegezugfestigkeit durch einen 3-Punktbiegezugversuch und andererseits die Druckfestigkeit durch einen Druckversuch. Für die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurden jeweils fünf Prismen 5x5x20 cm pro Mischung auf der Zwickprüfmaschine auf Biegung belastet. Die Druckfestigkeit wurde einerseits mit jeweils fünf stehenden Prismen 5x5x14 cm und andererseits mit fünf liegenden Prismen 5x5x20 cm auf der Prüfmaschine Walter+Bai geprüft. Bei den liegenden Prismen handelte es sich um die gleichen Prismen, wie beim 3-Punktbiegezugversuch, wobei der Druckversuch an den kaum beanspruchten Randzonen der Prismen durchgeführt wurde. Somit handelte es sich bei der Prüfung der Druckfestigkeit mit liegenden Prismen eigentlich um einen Druckversuch an einem Würfel 5x5x5 cm.

5.3.1 Prüfmaschinen

Walter+Bai

Bei der Walter+Bai handelt es sich um eine hydraulische Druckprüfmaschine (es kann keine Prüfung auf Zug durchgeführt werden), welche eine maximale Druckkraft von 4000 kN auf einen Probekörper ausüben kann. Die Maschine kann entweder via einer Computersoftware oder von Hand über das Schaltbrett aus gesteuert werden. Zusätzlich wurden noch bei der Druckprüfung der stehenden Prismen drei Wegmesser am Rand des Probekörpers installiert (siehe Abbildung 5.8), welche die Stauchung mittels einer Computersoftware (CATMAN) aufzeichneten. Die Belastungsgeschwindigkeit des Probekörpers kann entweder weg- oder kraftgesteuert erfolgen.

Zwick 1454 10 kN

Die Zwick ist eine elektromechanische Universalprüfmaschine, die eine maximale Kraft von 10 kN auf einen Probekörper aufbringen kann. Im Gegensatz zur Walter+Bai kann es sich hierbei um eine Zug- oder Druckkraft handeln. Die Kraft wird computergesteuert über eine fahrende Traverse auf den zu testenden Probekörper aufgebracht. Dank dem Verschiebungssensor Multisens können die Verformungen des Probekörpers gemessen werden. Die Zwick wurde bei dieser Arbeit für den 3-Punktbiegezugversuch verwendet.

Abbildung 5.8: Zwick 1454 10 kN



5.3.2 Druckprüfung an stehende Prismen 5x5x14 cm

Wie bereits erwähnt erfolgten die Druckprüfungen auf der Walter+Bai. Dank der benutzerfreundlichen Steuerungssoftware konnten die Tests schnell und zuverlässig durchgeführt werden. Für die Prüfungen wurden eine weggesteuerte Belastungsgeschwindigkeit von 0.005 mm/s und ein Abbruchkriterium von 3 mm Stauchung im Prüfprogramm festgelegt. Nach dem Anfahren auf die Vorkraft von 2 kN wurde die Prüfung automatisch angehalten, die Stauchung auf null gesetzt und danach wurde die Prüfung fortgesetzt. Pro Mischung wurden jeweils 5 Prismen dieser Druckprüfung unterzogen (siehe Abbildung 5.8).

Abbildung 5.9: Druckprüfung an stehenden Prismen 5x5x14 cm auf der Walter+Bai



vor der Prüfung



nach der Prüfung

5.3.3 3-Punktbiegezugveruch an Prismen 5x5x20 cm

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurde an der Zwick durchgeführt. Auch hier konnten dank einer benutzerfreundlichen Steuerungssoftware die Tests schnell und zuverlässig vollzogen werden. Ebenfalls konnte beim Prüfprogramm die weggesteuerte Belastungsgeschwindigkeit von 0.03 mm/s definiert werden. Nach dem Anfahren auf eine Belastung von 50 N wurde die Prüfung automatisch angehalten, die Durchbiegung auf null gesetzt und danach wurde die Prüfung fortgesetzt. Im Gegensatz zur Druckprüfung wurde kein Abbruchkriterium festgelegt, da grosse Unterschiede im Verformungsverhalten der einzelnen Mischungen erwartet wurden. Somit erfolgte der Abbruch manuell. Der Abstand der beiden Auflager betrug 15 cm. Die Auflager, wie auch der Belastungspunkt, waren mit einem zylinderförmigen Aufsatz ausgestattet, um die Oberfläche des Probenkörpers bei der Belastung nicht zu verletzen. Die Durchbiegung wurde wie bereits erwähnt durch den Multisens aufgezeichnet.

Abbildung 5.10: 3-Punktbiegezugversuch an der Zwick 1454 10 kN



vor der Prüfung



nach der Prüfung

5.3.4 Druckprüfung an liegenden Prismen 5x5x20 cm

Die Druckprüfung an liegenden Prismen 5x5x20 cm entsprach eigentlich einer Prüfung der Druckfestigkeit an einem Würfel 5x5x5 cm, da der Randbereich der Prismen getestet wurde, die bereits dem 3-Punktbiegezugversuch unterzogen wurden. Diese Vorbelastung sollte aber keinen messbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit haben, da die geprüften Randzonen beim 3-Punktbiegezugversuch durch die Belastung nicht geschädigt wurden. Die kraftgesteuerte Belastungsgeschwindigkeit betrug 0.6 MPa/s, als Abbruchkriterium wurde der Bruch definiert. Sonst entsprachen die Anordnung und der Ablauf der Prüfung demjenigen der Druckprüfung an stehenden Prismen, jedoch wurden keine zusätzlichen Wegmesser verwendet, da die Verformung nicht erfasst wurde.

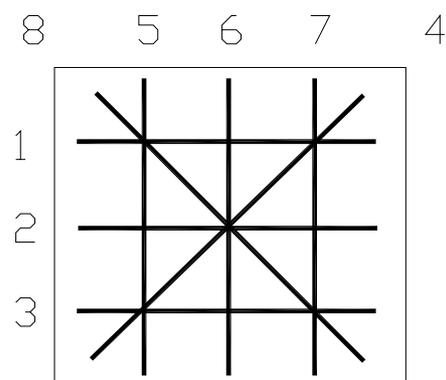
5.4 Wärmedurchgangszahl λ

Für die Messung der Wärmedurchgangszahl wurden die aufgeschnittenen Würfel 15x15x15 cm verwendet. Wie bereits erwähnt, lagerten die Würfel vor der Prüfung mindestens eine Woche im Raum der Prüfung um zu akklimatisieren. Die Prüfung fand bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von ca. 40%.

Die Messung an den Halbwürfeln lief folgendermassen ab:

- 1) 1 Messung der Referenzprobe
- 2) 3 Messungen in horizontaler Richtung
- 3) 1 Messung in diagonaler Richtung
- 4) 1 Messung der Referenzprobe
- 5) 3 Messungen in vertikaler Richtung
- 6) 1 Messung in diagonaler Richtung
- 7) 1 Messung der Referenzprobe

Abbildung 5.11: Ablauf der Wärmedurchgangsmessung



Falls die Messungen am gleichen Tag stattfanden, konnte der Referenzwert von Punkt 7) als Referenzwert für Punkt 1) verwendet werden.

Abbildung 5.12: Wärmedurchgangsmessung



5.5 Auswertung

Nach dem praktischen Teil der Arbeit folgte die Auswertung und Analyse der Daten. In der Auswertungsphase wurden die erhaltenen Daten aufbereitet, indem sie miteinander verglichen und/oder verknüpft wurden, um mögliche Relationen festzustellen. Dabei wurden alle Daten ins Microsoft Excel exportiert, um die Erstellung von Diagrammen zu erleichtern.

6 Resultate

6.1 Vorversuche

Die Vorversuche haben zum Ziel, die maximalen Fasergehalte anhand der Mischbarkeit für drei verschiedene Faserlängen zu ermitteln bzw. die rheologischen Eigenschaften infolge des Zumischens von Kunststofffasern zu bestimmen. Bei den ersten Vorversuchen wurde ein Schaumanteil von 40% festgelegt. Dieser gilt für alle Mischungen der Vor- und Hauptversuche, ausgenommen für die Referenzmischung 1 mit 0% Fasern und 0% Schaum.

6.1.1 Rheologie

Die Resultate der Vorversuche sind in Tabelle 6.1 zu sehen. In Abbildung 6.1 ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Faseranteil je betrachteter Faserlänge das Ausbreitmass abnimmt. Hingegen steigt die Dichte mit zunehmendem Faseranteil (Abbildung 6.2). Dies könnte damit zu tun haben, dass die Faserspitzen den Schaum zerstören und damit die Schaumstabilität abmindern.

Tabelle 6.1: Resultate Vorversuche				
Faserlänge	Faseranteil [%]	Ausbreitmass	Dichte[kg/jm ³]	Bemerkungen
24 mm	0.4	16	1103.8	ok
24 mm	0.8	15.5	1134.4	ok
24 mm	1	15	1099.2	ok
12 mm	1.5	16.5	1141.1	ok
12 mm	2	16.5	1175.2	ok
12 mm	2.5	15	1145.9	ok
3 mm	3	19	1347.3	zu schwer
3 mm	5	16.5	1106.7	ok
3 mm	6	16	1375.9	zu schwer
3 mm	7	16	1557.5	viel zu schwer

Abbildung 6.1: Ausbreitmass-Faseranteil-Diagramm

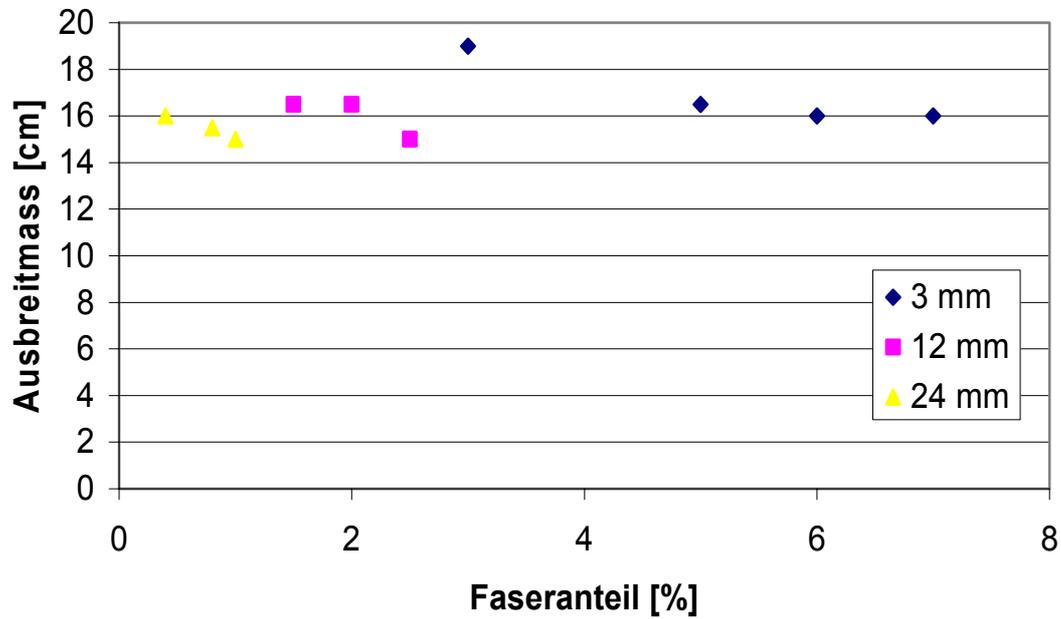
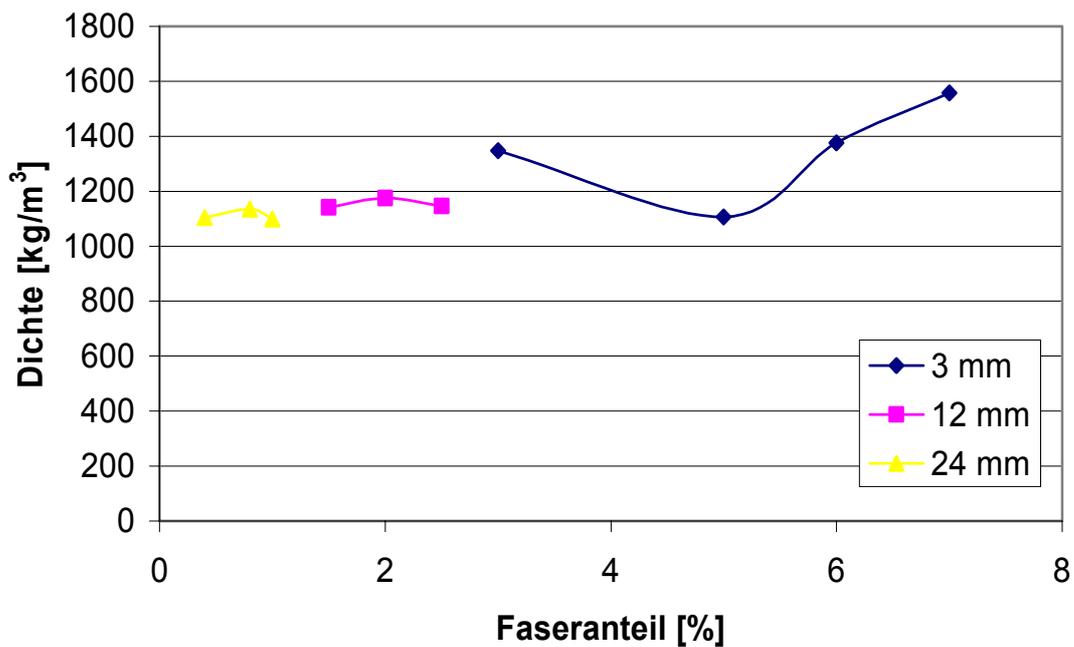


Abbildung 6.2: Dichte-Faseranteil-Diagramm



6.1.2 Maximaler Faseranteil

Der maximale Faseranteil wurde durch die Mischbarkeit und das kleine Ausbreitmass bestimmt. Die Erkenntnis des Versuchs war, dass alle Mischungen ein Ausbreitmass grösser gleich 15 cm aufwiesen (siehe Tabelle 6.1: Resultate Vorversuche), was ein akzeptabler Wert ist. Deshalb wurde der maximale Faseranteil hauptsächlich durch die Mischbarkeit bestimmt. Das Kriterium dazu ist, dass beim Mischen kein Klumpeneffekt (Abbildung 6.3) eintrat. Es wurden jeweils Mischungen mit steigendem Fasergehalt hergestellt, bis ein Verklumpen der Fasern ersichtlich wurde.

Abbildung 6.3: Klumpeneffekt



Aus den Vorversuchen konnten folgende maximale Faseranteile festgestellt werden: für 24 mm Fasern 0.8%, für 12 mm Fasern 2% und für 3 mm Fasern 6%. Diese dienten als Grundlage für die Mischungen der Hauptversuche.

6.2 Drainagemessung

Während der Hauptversuche wurden bei jedem Arbeitstag der Probenherstellung zwei Drainagemessungen absolviert (Abbildung 6.4). Diese Tests wurden jeweils vor und nach dem Mischen bzw. der Herstellung der Probekörper durchgeführt. Dies

diente sowohl als Berechnungsgrundlage der Schaumdichte als auch der Kontrolle der Kontinuität der Schaumherstellung des Schaumgenerators.

Abbildung 6.4: Drainagemessung



In der Tabelle 6.2 sind die Resultate der Drainagetests dargestellt. Die detaillierten Daten können dem Anhang C entnommen werden. Die Dichte des Schaums ist sehr stabil geblieben, was ein konstantes Schaum-Zement-Wasser-Verhältnis der Zementmischungen ermöglichte. Die Drainage nach 5 Minuten schwankt stark, aber die Menge des drainierten Wassers ist noch klein, so dass diese Schwankung nicht aussagekräftig ist. Die Drainage nach 20 Minuten ist hingegen bei allen Tests sehr konstant, mit Ausnahme von der Referenz. Die Drainagemengen sind bei der Referenz deutlich kleiner, als bei den Mischungen mit Fasern. Der Grund dafür ist möglicherweise das anfänglich nicht geübte und nicht festgelegte Vorgehen, da das Resultat sehr stark auf zeitliche Abweichungen beim Vorgehen reagiert. Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass der Schaumgenerator eine sehr konstante Leistung aufweist. Diese garantiert die Kontinuität der Schaumherstellung.

Tabelle 6.2 Drainagetest

Drainage nach:	5 Min. [g]	10 Min.[g]	15 Min.[g]	20 Min.[g]	Dichte [kg/m ³]
Referenz(vor)	1.13	119.77	278.37	428.03	82.70
HV1(vor)	18.77	189.37	381.00	546.33	82.42
HV1(nach)	12.97	179.07	364.70	523.43	83.25
HV2(vor)	16.43	203.83	394.83	563.37	81.93
HV2(nach)	17.67	216.03	419.13	599.13	85.76
HV3(vor)	9.60	166.00	344.37	504.13	80.38
HV3(nach)	24.50	215.47	382.83	579.23	81.02
Mittelwert	14.44	184.22	366.46	534.81	82.49
Standardabw.	7.50	33.94	45.29	57.05	1.74
in % der Gesamtmasse	0.93	11.88	23.63	34.48	-

6.3 Hauptversuche

Bei den Hauptversuchen handelt es sich einerseits um die Rheologie des Frischbetons, andererseits um die mechanischen Eigenschaften des erhärteten Betons. Die Rheologie umfasst die Mischbarkeit, die Fließfähigkeit und die Faserausrichtung. Die mechanischen Eigenschaften beinhalten die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit. Zudem wurde noch die Wärmedurchgangsfähigkeit gemessen.

6.3.1 Rheologie

Es wurden vier Tests durchgeführt: die Bestimmung der Dichte, das kleine Ausbreitmass, die SegBox und die U-Schalung. Zur Beurteilung der rheologischen Eigenschaften gilt folgendes:

Ausbreitmass:	je grösser desto flüssiger
Segbox:	je kleiner desto flüssiger
U-Schalung:	je kleiner desto flüssiger

Tabelle 6.3 gibt eine Übersicht über alle Resultate der Rheologie. Eine schwache Tendenz zeigen die Resultate vom Ausbreitmass, dass der Schaum die Fliessfähigkeit vermindert. Eine Änderung der Fliessfähigkeit durch Zumischen der Fasern ist aber nicht eindeutig festzustellen. Interessant ist die Mischung mit 6% 3 mm Fasern. Auf Grund der hohen Frischbetondichte ist davon auszugehen, dass viele Poren zerstört worden sind. Dadurch ist das Ausbreitmass mit 18 cm sehr gross. Der Einfluss des Schaums wird durch Reduktion des Schaumanteils verringert. Die Resultate von der SegBox und der U-Schalung zeigen ein anderes Fliessverhalten der Mischungen im engen geschlossenen Raum. Mischungen mit kurzen Fasern (3 mm) sind flüssiger als Mischungen mit langen Fasern (12 mm und 24 mm). D.h., dass die längeren Fasern den Fliesswiderstand stärker erhöhen als die kürzeren.

Ähnlich wie bei den Vorversuchen stimmen die gemessenen Dichten der Mischungen mit den Soll-Dichten (gerechnet) überein. Einzig bei den Mischungen mit 3 mm Fasern weichen die Werte von den Soll-Werten ab. Dies ist wiederum auf die Zerstörung der Schaumporen zurückzuführen.

Zu beachten ist die Mischung mit 0.8% 24 mm Fasern, da deren Dichte sowie das Resultat der U-Schalung von der Erwartung abweichen. Es ist zu vermuten, dass zu viel Schaum eingemischt wurde. Möglicherweise geschah beim Abwiegen vom Schaum ein Fehler. Diese Vermutung wurde später bei den mechanischen Tests bestätigt.¹

Porenstruktur

Abbildung 6.5 zeigt den Einfluss der Fasern auf die Porenstruktur. Bei der Probe mit 6% 3 mm Fasern sind viele Poren zerstört worden, was zu einer höheren Dichte

¹ vgl. 6.3.2: Druckversuch an stehenden Prismenproben / 6.3.3: 3-Punktbiegezugversuch an liegenden Prismenproben

fürte. Die Porenverteilung ist auch im Vergleich zur Probe ohne Fasern sehr unregelmässig. Weitere Porenstrukturfotos sind im Anhang F zu finden.

Abbildung 6.5: Einfluss der Fasern auf Porenstruktur



Referenz2 (40% Schaum, ohne Fasern)



HV3 (6% 3 mm Fasern)

Tabelle 6.3: Rheologie

Faserlänge	Einheit	0% Fasern		24 mm		12 mm		3 mm	
Faseranteil		0% Schaum	40% Schaum	0.40%	0.80%	1%	2%	3%	6%
Soll-Dichte	[kg/m ³]	1898.56	1198.50	1197.22	1194.82	1192.52	1187.58	1180.91	1162.95
Dichte	[kg/m ³]	1913.75	1201.25	1228.68	987.48	-*	~1175**	1648.09	1698.18
Ausbreit- mass	[cm]	20.00	17.50	16.50	17.00	18.00	17.00	16.50	18.00
SegBox	[cm]	2.50	2.50	4.50	3.50	4.50	3.00	3.00	3.50
U-Schalung	[cm]	11.90	13.00	14.50	13.50	13.00	14.00	11.00	13.50

*: Diese Zahl wurden nicht erfasst. **: Diese Zahl wurden nicht erfasst. Nach Vergleich der Trockendichte wurde die Dichte aus dem Vorversuch genommen.

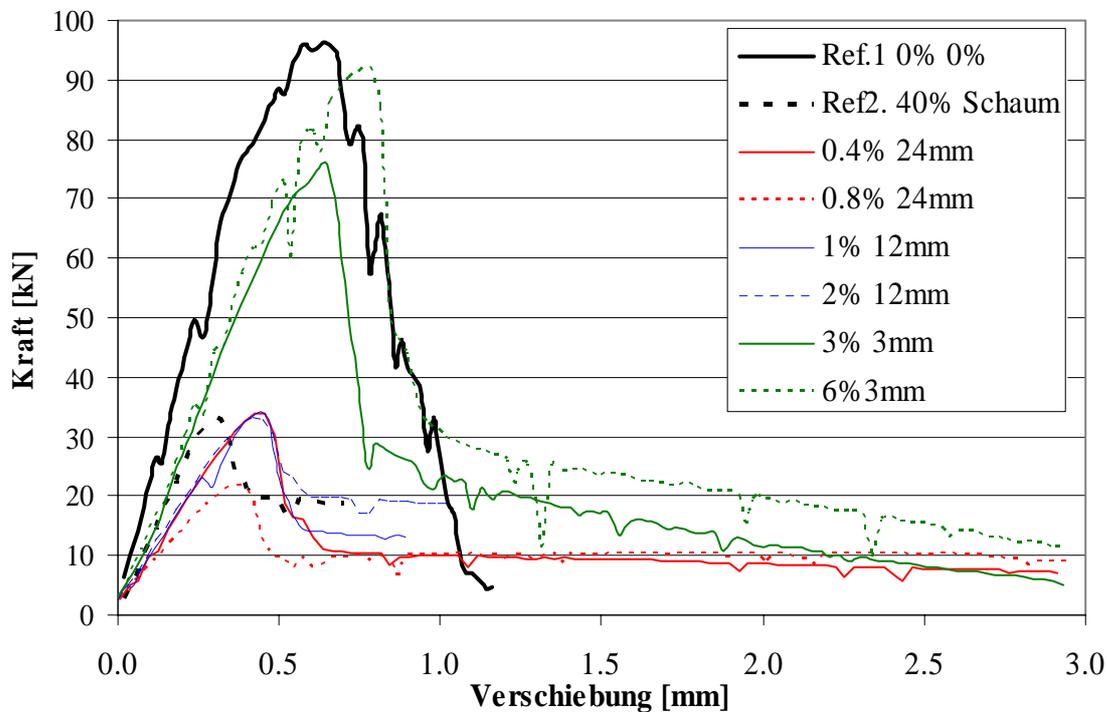
6.3.2 Druckversuch an stehenden Prismenproben

Die Resultate der Druckversuche an stehenden Prismenproben sind als Kraft-Verschiebungskurven in Abbildung 6.6 dargestellt. Es handelt sich um die Mittelwertkurve aus fünf Proben je Serie.¹ Da nicht alle Proben in einer Serie gleichzeitig an gleicher Höhe die Maximalkraft erreichen, ist es vernünftig, die Mittelwerte zu betrachten. Allerdings muss in Kauf genommen werden, dass unschöne Störungen in der Kurve zu sehen sind. Ausführliche Diagramme der Kraft-Verschiebungskurven aller Proben sind im Anhang E1 zu finden.

Abgesehen von den unterschiedlichen Maximalkräften haben alle Kurven einen ähnlichen Verlauf. Nach dem Erreichen der Anfahrkraft steigt die Kraft proportional mit der Verschiebung. Die Probe verhält sich elastisch. Kurz vor dem Erreichen der Maximalkraft verhält sich die Probe elastoplastisch. Nach dem Erreichen der Maximalkraft sinkt die Kraft rasch mit zunehmender Verschiebung bis auf etwa 30% des Maximalwertes. Danach bleibt die Kraft konstant während die Verschiebung weiter steigt. Eine Verschiebung von 3 mm wurde als Abbruchkriterien für den Versuch definiert. Bei den Referenzproben ohne Schaum wurde diese Stauchung nicht erreicht, da meistens ein Sprödbruch erfolgte.

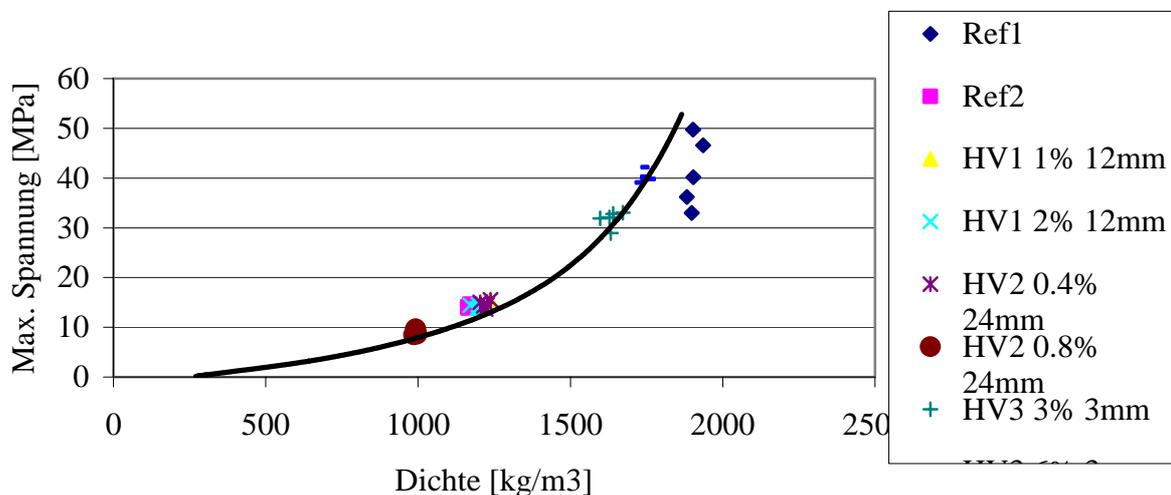
¹ Vgl. Tabelle 5.1: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen der Hauptversuche

Abbildung 6.6: Kraft-Verschiebung-Diagramm (Druckversuch stehender Prismen)



In Abbildung 6.7 ist das Verhältnis zwischen Maximalspannung und Dichte ersichtlich. Werte aus dem Versuch sind als Punkte dargestellt. Eine Referenzkurve aus den Versuchsergebnissen von D. Meyer dient als Vergleichsbasis. Diese Daten sind Ergebnisse aus 53 Mischungen mit verschiedenen Schaumanteilen ohne Fasern. Referenz 1 ist eine Mischung ohne Schaum und ohne Fasern, deren Ergebnisse etwas tiefer als die Referenzkurve liegen. Die Ergebnisse der Mischungen in den Hauptversuchen mit Fasern liegen alle sehr nah an der Referenzkurve. Das Zusammenwirken der Fasern hat also keinen eindeutigen Einfluss auf die Druckfestigkeit der Proben. Eindeutig ist aber die starke Abhängigkeit der Maximalkraft von der Dichte, d.h. die Dichte ist immer noch massgebend für die Druckfestigkeit der Schaumbetonproben.

Abbildung 6.7: Maximalspannung-Dichte-Diagramm (Druckversuch stehender Prismen)



Besonders gut zu sehen ist, dass die vier Mischungen HV1 mit 1% 12 mm Fasern, HV1 mit 2% 12 mm Fasern, HV2 mit 0.4% 24 mm Fasern und Referenz 2 mit 0% Fasern, die beinahe die gleiche Dichte haben, auch die gleiche Festigkeit erreichen. Wie oben schon erwähnt, wurden die Proben mit 0.8% 24 mm Fasern wahrscheinlich mit zu grossem Schaumanteil hergestellt. Dies zeigte auch das Resultat des Druckversuchs.

6.3.3 3-Punktbiegezugversuch an liegenden Prismenproben

Die Resultate der 3-Punktbiegezugversuche an liegenden Prismenproben sind als Kraft-Weg-Diagramme in Abbildung 6.8 dargestellt. Wie bei den Druckversuchen handelt es sich um die Mittelwertkurve aus 5 Proben je Serie.¹ Ausführliche Kraft-Weg-Diagramme aller Proben sind dem Anhang E2 zu entnehmen.

¹ vgl. Tabelle 5.1: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen der Hauptversuche

Trotz unterschiedlicher Maximalkraft verlaufen alle Kurven vor dem Erreichen der Maximalkraft sehr ähnlich, und zwar so, dass die Kraft mit zunehmender Durchbiegung (Weg) proportional steigt. Die Proben verhalten sich elastisch. Nach dem Erreichen der Maximalkraft ist das Verhalten der Proben sehr unterschiedlich. Die Referenzproben wurden ohne Zumischen von Fasern hergestellt, deshalb gibt's nach dem Peak einen Sprödbbruch. Bei den Proben mit kürzeren (3 mm) Fasern wird eine sehr hohe Biegezugfestigkeit erreicht, nach dem Peak fällt die Kurve aber sehr rasch ab. Die Proben mit längeren (12 mm und 24 mm) Fasern erreichen eine mittlere Festigkeit. Beim Öffnen des ersten Risses kommt es zu einem Abfall der Kraft. Durch diesen Riss werden die Fasern an der Öffnung mobilisiert, wodurch die Kraft wieder ansteigt sogar noch höher als beim ersten Peak, bis ein zweiter Riss entsteht, der den zweiten Abfall der Kraft verursacht. Es entwickelt sich entsprechend weiter, bis einer der Risse so ausgedehnt ist, dass ein Bruch zu erkennen ist. Während der Weg weiter wächst (bis über 3 mm), bleibt die Kraft auf einem relativ hohen Niveau. Die Proben verhalten sich also sehr duktil.

Abbildung 6.8: Kraft-Weg-Diagramm (3-Punktbiegezugversuch liegender Prismen)

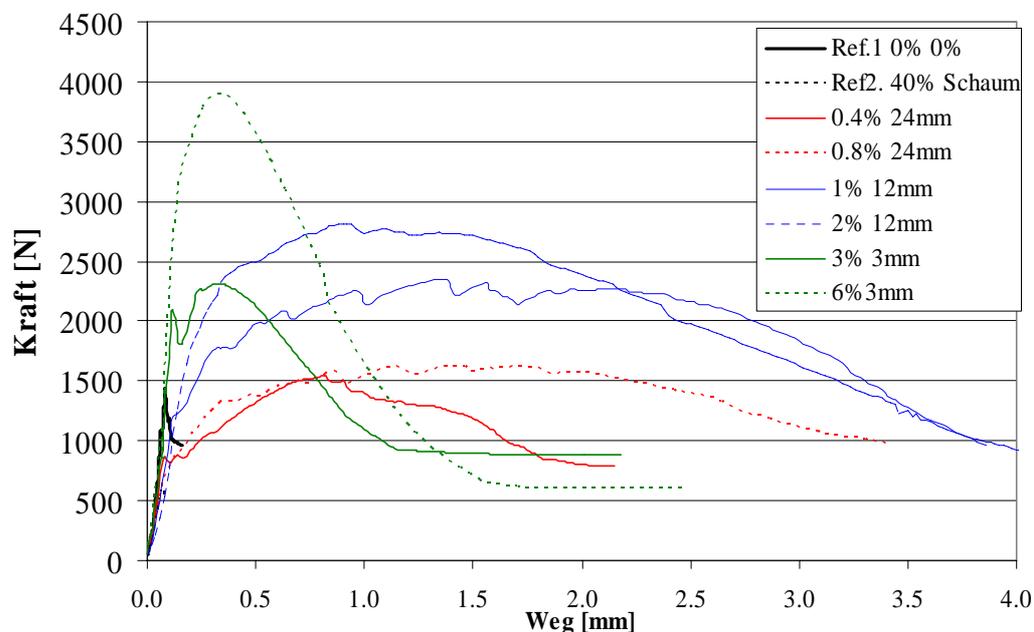
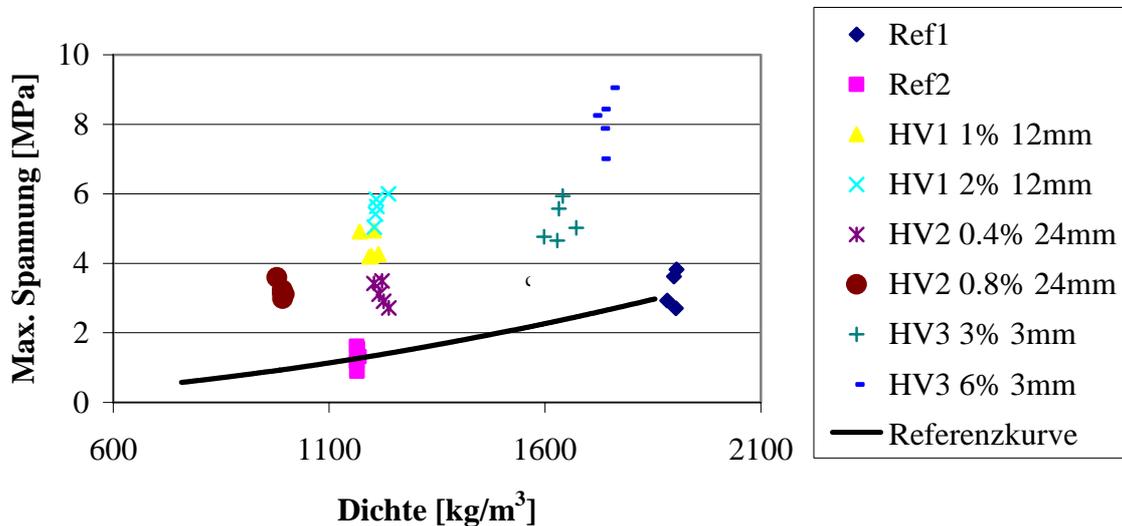


Abbildung 6.9: Maximalspannung-Dichte-Diagramm (3-Punktbiegezugversuch liegender Prismen)

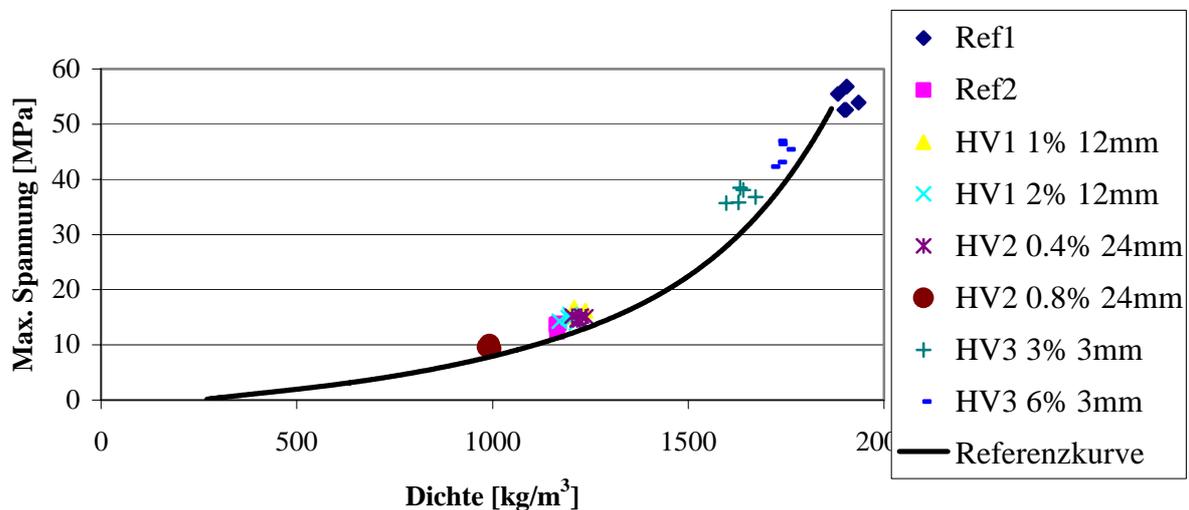


In Abbildung 6.9 ist das Verhältnis zwischen Maximalspannung und Dichte zu sehen. Werte aus dem Versuch sind als Punkte dargestellt. Eine Referenzkurve aus den Versuchsergebnissen von 13 Mischungen mit verschiedenen Schaumanteilen ohne Fasern von D. Meyer dient als Vergleichsbasis. Referenz 1 und 2 sind Mischungen ohne Fasern, deren Ergebnisse mit der Referenzkurve im grossen Mass übereinstimmen. Alle Mischungen mit Fasern weisen eine 2- bis 3-fache Erhöhung der Biegezugfestigkeit im Vergleich mit Proben der gleichen Dichte auf. Besonders interessant sind die Proben mit 0.4%, 1% und 2% Fasern, die fast die gleiche Dichte haben. Ihre Festigkeit steigt mit zunehmendem Fasergehalt. Ebenfalls ist bei den Referenzproben und Proben mit 0.8% 24 mm zu sehen, dass bei Mischungen (mit Fasern) mit nur etwa der halben Dichte die gleiche Biegezugfestigkeit erreicht werden kann.

Im Allgemeinen hängt die Maximalkraft von der Dichte ab. Das bedeutet, dass die Biegezugfestigkeit mit zunehmender Dichte steigt. Der Schaum reduziert die Dichte, aber gleichzeitig auch die Festigkeit. Die Fasern erhöhen einerseits die Festigkeit, zerstören andererseits aber die Poren (besonders wenn der Anteil von Fasern hoch ist).

6.3.4 Druckversuch an liegenden Prismenproben aus dem 3-Punktbiegezugversuch

Abbildung 6.10: Max. Spannung-Dichte-Diagramm (Druckversuch liegender Prismen)



In Abbildung 6.10 ist das Verhältnis zwischen Maximalspannung und Dichte aus den Druckversuchen an liegenden Prismenproben zu sehen. Werte aus dem Versuch sind als Punkte dargestellt. Zum Vergleichen dient dieselbe Referenzkurve wie in Abbildung 6.7. Die Resultate der Referenz 1 und 2 entsprechen der Referenzkurve sehr gut. Eindeutig ist wiederum die starke Abhängigkeit der Maximalkraft von der Dichte zu sehen. Diese gemessenen Werte entsprechen der Würfeldruckfestigkeit, weshalb die Resultate dieser Versuche höher als die Referenzkurve liegen. Der Grund dafür liegt darin, dass beim Druckversuch mit liegenden Prismen die Druckfestigkeit wegen der grösseren Querdehnungsbehinderung etwas höher ist, jedoch nicht 20% wie bei konventionellem Beton, sondern nur etwa 5-10%¹.

Wie schon bei den Druckversuchen an stehenden Prismenproben zu beobachten war, erreichten Mischungen mit derselben Dichte dieselbe Festigkeit. Fazit: Fasern haben keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit.

¹ vgl. Tabelle 6.4: Einfluss der Querdehnungsbehinderung

Tabelle 6.4: Einfluss der Querdehnungsbehinderung

Mischung	Stehend [MPa]	Liegend [MPa]	Verhältnis
Referenz1	41.14	54.28	0.76
Referenz2	14.13	13.22	1.07
HV2 0.4%	14.62	14.90	0.98
HV2 0.8%	9.11	9.76	0.93
HV1 1%	14.45	16.04	0.90
HV1 2%	14.06	14.70	0.96
HV3 3%	31.75	36.98	0.86
HV3 6%	40.19	44.82	0.90

6.4 Wärmedurchgangsmessung

Abbildung 6.11: Dichte – Wärmedurchgangszahl

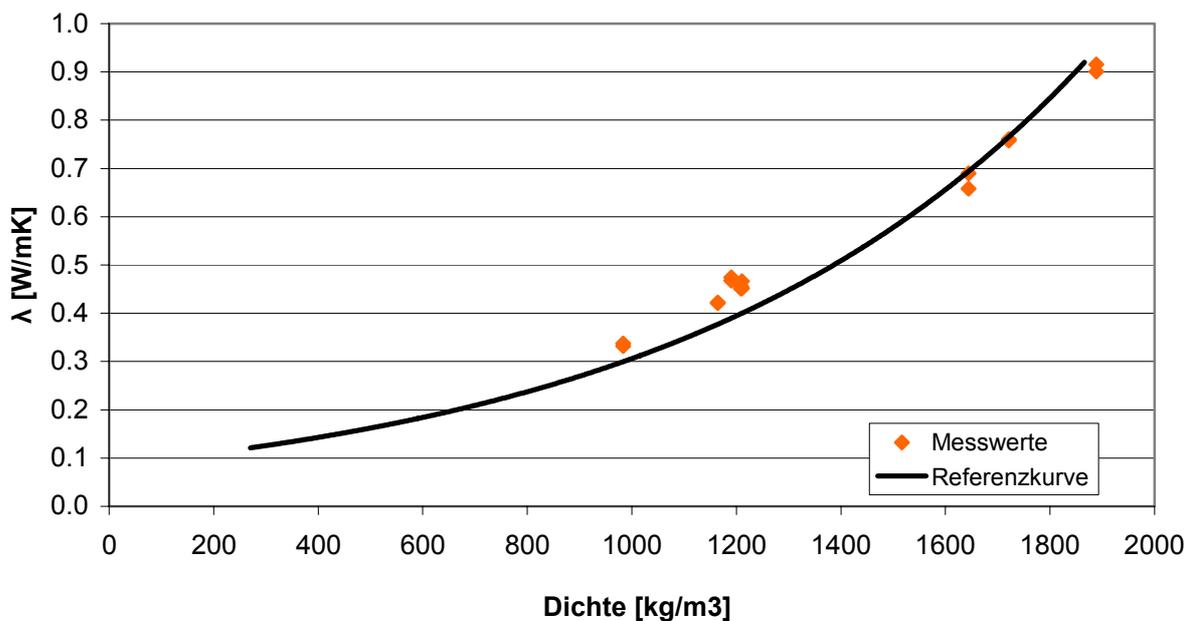


Abbildung 6.11 stellt das Verhältnis zwischen der Wärmedurchgangszahl λ und der Probendichte dar. Abgebildet sind die Mittelwerte aus den einzelnen Mischungen. Die detaillierten Messergebnisse sind dem Anhang G zu entnehmen. Werte aus dem Versuch sind als Punkte dargestellt. Wiederum dient eine Referenzkurve aus den Versuchsergebnissen von D. Meyer als Vergleichsbasis. Diese Daten sind Resultate aus 44 Mischungen mit verschiedenen Schaumanteilen ohne Fasern. Der Einfluss der Fasern auf die Wärmeleitfähigkeit des Schaumbetons ist sehr gering. Die Abweichungen der Punkte von der Referenzkurve liegen im Bereich der Messgenauigkeit.

7 Diskussion

7.1 Einfluss auf rheologische Eigenschaften

Die Faserlänge hat einen starken Einfluss auf die Mischbarkeit, denn je länger die Fasern sind, umso grösser ist die Gefahr der Klumpenbildung. Dabei ist zu beachten, dass die Klumpenbildung vor allem beim Einmischen der Fasern in den Zementleim stattfindet und dass die Mischbarkeit durch das Untermischen des Schaums wieder verbessert wird. Der Grund dafür liegt darin, dass beim Mischen ohne Schaum einerseits der W/Z-Wert tiefer und andererseits der Volumenanteil der Fasern höher ist, da erst mit dem Untermischen des Schaums der wirkliche, angestrebte W/Z-Wert bzw. Fasergehalt erzielt wird.

Der Schaumzementleim weist bei gleichem End-W/Z-Wert ein geringeres Ausbreitmass wie reiner Zementleim auf. Der Faserzementleim hat ebenfalls ein geringeres Fliessverhalten als Zementleim ohne Fasern.

Die Frischbetondichte verhält sich umgekehrt proportional zur Faserlänge, d.h. je kürzer die Fasern sind, desto grösser ist die Dichte. Dies lässt sich mit dem grösseren Porenzerstörungspotential der kleinen Fasern erklären.

Während die Porenstruktur der Referenz-, der 24 mm- und der 12 mm-Mischung ein ähnliches Gefüge aufweisen, so unterscheidet sich hingegen diejenige bei der 3 mm-Mischung. Der Grund dafür liegt möglicherweise darin, dass die kurzen Fasern viele Poren zerstören, was zu einer höheren Dichte führt.

7.2 Einfluss auf mechanische Eigenschaften

Bei der Analyse der mechanischen Eigenschaften wurde untersucht, ob die Fasern einen Einfluss auf die Druck- bzw. Biegezugfestigkeit haben und welche Rolle die Faserlänge dabei spielt.

7.2.1 Einfluss auf Druckfestigkeit

Primär beeinflussen die Fasern den Verlauf der Kraft-Verschiebungskurve dadurch, dass ein duktileres Verhalten hervorgerufen wird. Diese Duktilität ist weitgehend unabhängig von der Faserlänge: bis zum Erreichen der Maximalkraft verhält sich das

Material elastisch, nach dem Eintreten des Initialrisses fällt die Kraft bis auf die Residualfestigkeit ab und bleibt dann weitgehend konstant. Die Faserlänge hat kaum einen Einfluss auf die Maximalkraft, welche fast ausschliesslich durch die Dichte bestimmt wird, hingegen auf die Residualfestigkeit: je länger die Fasern sind, desto höher ist das Niveau der Residualfestigkeit im Verhältnis zur Maximalkraft.

Die erhaltene Maximalkraft der Druckfestigkeit an liegenden Prismen ist höher als diejenige an Stehenden, da bei den liegenden Prismen die Würfeldruckfestigkeit gemessen wurde, während bei den stehenden Prismen die Zylinderdruckfestigkeit ermittelt wurde. Bei der Würfeldruckfestigkeit ist der Einflussbereich der Querdehnungsbehinderung grösser, womit eine grössere Festigkeit erzielt wird. Jedoch liegt die Festigkeitszunahme nicht bei 20%, wie bei konventionellem Beton, sondern im Bereich von 5-10%.¹

7.2.2 Einfluss auf Biegezugfestigkeit

Die Resultate der 3-Punktbiegezugversuche zeigt folgendes deutlich:

Die eingemischten Fasern erhöhten die Biegezugfestigkeit bis auf das Dreifache. Mit der Entstehung und der Vergrösserung der Risse werden die Fasern aktiviert, die das Biegemoment übernehmen.

Neben der Erhöhung der Beigezugfestigkeit bewirken die Fasern auch ein duktileres Verhalten der Proben. Besonders bei den langen Fasern ist die Duktilität der Proben sehr stark erhöht.

Kurze Fasern beeinflussen hauptsächlich die Festigkeit, während die langen Fasern für die Duktilität verantwortlich sind.

7.3 Einfluss auf die Wärmedurchgangsfähigkeit

Das Einmischen von Fasern hat keinen eindeutigen Einfluss auf die Wärmedurchgangsfähigkeit, der mit der gegebenen Methode beziffert werden kann.

¹ vgl. Tabelle 6.4: Einfluss der Querdehnungsbehinderung

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Als wichtigste, gewonnene Erkenntnisse können folgende Punkte festgehalten werden:

- Für die Mischbarkeit und die Qualität der Mischung ist entscheidend, dass zuerst die Fasern und der Zementleim gemischt werden und dass erst dann der Schaum untergemischt wird.
- Das Fließverhalten wird durch die Fasern leicht verschlechtert.
- Kurze Fasern beeinflussen die Porenstruktur negativ, d.h. viele Poren werden durch die Faserspitzen zerstört, was eine höhere Dichte zur Folge hat.
- Bei der Druckfestigkeit wird die Residualfestigkeit im Verhältnis zur Maximalkraft erhöht. Die Druckfestigkeit selbst ist aber primär von der Dichte abhängig.
- Der Querdehnungseinfluss (Verhältnis zwischen Würfeldruck- und Zylinderdruckfestigkeit) liegt beim faserverstärkten Schaumbeton um die 10%.
- Die Fasern führen bei der Biegezugfestigkeit zu einer Erhöhung der Maximalkraft. Zudem kann durch die Fasern ein duktileres Bruchverhalten erzielt werden.
- Auf die Wärmedurchgangsfähigkeit haben die Fasern keinen eindeutigen Einfluss.

In weiteren Arbeiten könnten verschiedene Schaumanteile, weitere Faserlängen und Fasertypen oder das Verhalten von verschiedenen Faserlängen in derselben Mischung (Fasercocktail) untersucht werden, um so einen faserverstärkten Schaumbeton herzustellen, welcher die guten Eigenschaften der einzelnen Faserlängen optimal ausnutzt. Als Endziel muss natürlich die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis definiert werden.

9 Literatur

- [1] H. Beck (1979); Kunststoff Lexikon; 5. Auflage; Carl Hanser Verlag, München
- [2] R. Custer (2006); Fliessverhalten von faserverstärktem Hochleistungsbeton; Semesterarbeit am IfB, ETH Zürich
- [3] D. Meyer (2004); Foamed cementitious materials; Semester project building materials; ETH Zürich
- [4] D. Häslar, R. Schärer (2004); Rheologie von hybridem Faserbeton mit Kunststofffasern; Semesterarbeit am IBWK, ETH Zürich

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Eigenschaften der PVA-Fasern.....	4
Tabelle 4.1: Eigenschaften des Kunststofffasertyps Kururay RF 350.....	7
Tabelle 4.2: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen der ersten Vorversuche.....	8
Tabelle 4.3: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen des Vorversuches mit 12 mm langen Fasern	10
Tabelle 4.4: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen des Vorversuches mit 3 mm langen Fasern	11
Tabelle 4.5: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen des Vorversuches mit 24 mm langen Fasern	12
Tabelle 5.1: Übersicht über die Zusammensetzung der Mischungen der Hauptversuche.....	14
Tabelle 6.1: Resultate Vorversuche	29
Tabelle 6.2 Drainagetest.....	33
Tabelle 6.3: Rheologie	35
Tabelle 6.4: Einfluss der Querdehnungsbehinderung.....	42

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.2: aufgeschnittener Probekörper.....	9
Abbildung 5.1: Schaumgenerator.....	16
Abbildung 5.2: SegBox	17
Abbildung 5.3: U-Schalung (links: mit Stütze).....	18
Abbildung 5.4: Mischer	19
Abbildung 5.5: SegBox und U-Schalung.....	20
Abbildung 5.6: Probenlagerung im Feuchtraum.....	21
Abbildung 5.7: Maschinen der Probenvorbereitung.....	22
Abbildung 5.8: Zwick 1454 10 kN.....	24
Abbildung 5.9: Druckprüfung an stehenden Prsimen 5x5x14 cm auf der Walter+Bai ..	25
Abbildung 5.10: 3-Punktbiegezugversuch an der Zwick 1454 10 kN.....	26
Abbildung 5.11: Ablauf der Wärmedurchgangsmessung.....	27
Abbildung 5.12: Wärmedurchgangsmessung	28
Abbildung 6.1: Ausbreitmass-Faseranteil-Diagramm.....	30
Abbildung 6.2: Dichte-Faseranteil-Diagramm	30
Abbildung 6.3: Klumpeneffekt	31
Abbildung 6.4: Drainagemessung.....	32
Abbildung 6.5: Einfluss der Fasern auf Porenstruktur.....	35
Abbildung 6.6: Kraft-Verschiebung-Diagramm (Druckversuch stehender Prismen)	37

Abbildung 6.7: Maximalspannung-Dichte-Diagramm
(Druckversuch stehender Prismen) 38

Abbildung 6.8: Kraft-Weg-Diagramm
(3-Punktbiegezugversuch liegender Prismen)..... 39

Abbildung 6.9: Maximalspannung-Dichte-Diagramm
(3-Punktbiegezugversuch liegender Prismen)..... 40

Abbildung 6.10: Max. Spannung-Dichte-Diagramm
(Druckversuch liegender Prismen) 41

Abbildung 6.11: Dichte – Wärmedurchgangszahl 43