

DIplomARBEIT

Master Thesis

Beitrag zur Entwicklung eines selbstverdichtenden Leichtbetons

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

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing.DDr.-techn.

Elemer Bölcskey

E206 Institut für Hochbau und Technologie

Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit

unter Mitwirkung von

Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Kirnbauer

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Bernhard Schneider BSc.

0726465

Stadtgrabengasse 9a/2, 2225 Zistersdorf

Wien, am 15.11.2013

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit war, einen selbstverdichtenden Leichtbeton (SVLB) zu entwickeln. Daher wurden mehrere Tests, basierend auf zwei bekannten Betonarten durchgeführt. Diese Betonarten sind der selbstverdichtenden Beton und der Leichtbeton. Ihre Nachteile sind entweder ihre hohe Wärmeleitfähigkeit oder ihrer große Dichte. Normalbeton hat eine Trockendichte von 2000 bis 2600 kg/m³. Gemäß österreichischer Betonnorm wird Beton mit einer Rohdichte zwischen 800 und 2000 kg/m³ als Leichtbeton bezeichnet. In den ersten beiden Kapiteln sind die Geschichte und die technologischen Eigenschaften der beiden bekannten Betonarten beschrieben. Um einen SVLB zu entwickeln, muss man beginnend mit der Leimphase über die Mörtelphase bis hin zur Betonphase alle Entwicklungsschritte erfolgreich absolvieren (siehe Abb.28). Um eine schnellere Entwicklung zu ermöglichen, wurden alle Versuche aufeinander aufbauend durchgeführt. Dadurch war eine schnelle Optimierung in der verschiedenen Versuchsphasen möglich (siehe Tabelle 107; Tabelle 108; Tabelle 109). Im Laufe der Versuchsdurchführung wurde allerdings bald festgestellt, dass dieses Schema mit den geplanten Ausgangsstoffen nicht erreicht werden konnte, es wurde daher ein eigenes Durchführungsschema entwickelt. Nicht jeder Zuschlagstoff ist für die Entwicklung eines SVLB geeignet. Flugasche ist zum Beispiel ein besserer Zuschlagsstoff als Kalkmehl. Nach Beendigung der Leimversuche wurden, aufbauend auf diese, die Mörtelversuche durchgeführt. Nach diesen wurde mit den Betonversuchen begonnen. Die gleichmäßige Verteilung des Granulates in der Suspension stellte die größte Herausforderung bei der Entwicklung dar. Durch die Einhaltung der Versuchsgrenzen nach *Okamura*, für die Entwicklung eines Leichtbetons und eines selbstverdichtenden Betons, konnte auch für einen selbstverdichtenden Leichtbeton eine Rezeptur gefunden werden. Ausschlaggebend für die stetige Optimierung war die genaue Berechnung der Inhaltsstoffe. In dem vierten Kapitel sind die Versuche chronologisch angeführt. Die Versuche des fertigen Betons ergaben eine maximale Festigkeit von 15,58 N/mm² bei einem Gewicht von 1871,96 kg/m³.

Abstract

The aim of this study was to develop a self-compacting lightweight concrete (SCLC). For this, several tests were performed. These were based on two well-known types of concrete. The name of them is self-compacting concrete and lightweight concrete. The disadvantages of them are their high thermal conductivity and its great density. Normal concrete has a dry density from 2000 to 2600 kg/m³. According to the Austrian concrete standard concrete is designated with a density between 800 and 2000 kg/m³ as lightweight concrete. The history and the technological properties of the two known types of concrete have been processed in the first two chapters. The attempts to characterize the concrete are also given in the first two chapters. To develop a SCLC, you have to start with the glue phase of the mortar phase to the concrete phase (see Abb.28). The experiments were always performed build on each other, resulting in rapid optimization in the different phase of the experiment was possible (see Tabelle 107, Tabelle 108, Tabelle 109).

Throughout the experiment, however, it was soon found that this scheme could not be achieved with the proposed starting materials, a private implementation scheme was therefore developed. In the development of the cement paste it was found that not every aggregate is suitable for self-compacting concrete. As fly ash is better than lime powder as an additive. After completion of the glue experiments, the mortar experiments started. After them it was started with the concrete experiments. The biggest challenge was, in the concrete to distribute the granules, which is responsible for saving weight evenly and to prevent the lift was. By adhering to the limits trying to *Okamura*, for the development of the lightweight concrete and self compacting concrete, a formula could be found for a self compacting lightweight concrete. The main reason for the continuous optimization was the exact calculation of the ingredients. In the fourth chapter, the experiments are listed chronologically. The tests of the finished concrete showed a maximum strength of 15,58 N/mm² at a weight of 1871,96 kg/m³.

With this work a step towards developing a self compacting lightweight concrete was made. An increase in strength may be achieved by the reduction of the coarse components. It would be interesting to remove all components of a diameter larger than 1mm from the mixture. Thus, the mixture would be more compact. However, this would also result in an increase in weight. Against this, the proportion of the granules may be increased. A future work could deal with the problem of how the finished concrete can be transported over a height difference of several meters. Since it must be assumed that a high pressure, which is created when pumping, the water in the mixture is pressed into the porous granules.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing.DDr.-techn. Elemer Bölcskey für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an diesem Institut durchzuführen und weiteres für die Bereitstellung der Laboreinrichtungen und Baustoffe zur Durchführung der Versuche bedanken.

Weiteres danke ich meinem Betreuer Ass.Prof.Dipl.-Ing.Dr.-techn. Heinrich Bruckner für seine fachliche Unterstützung sowie seine Ideen und Anregungen, die wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben

Mein Dank gilt ebenso Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Kirnbauer für die entgegenkommende Hilfe und tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Auch meiner Freundin Kristina, den Studienkollegen und allen Freunden, die mich während dem Studium begleitet haben, möchte ich Danke sagen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, allen voran bei meinen Eltern, die mir dieses Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Inhalt

Inhalt	5
1 Einleitung	7
2 Grundlagen	9
2.1 Beton Geschichte	9
2.2 Selbstverdichteter Beton	11
2.2.1 Geschichte	11
2.2.2 Grundlagen des selbstverdichtenden Betons	11
2.2.3 Wahl der Ausgangsstoffe	13
2.2.4 Mischungsentwurf	15
2.2.5 Festlegung des Luftgehalts	15
2.2.6 Volumen der groben Gesteinskörnungen	16
2.2.7 Volumen für die feinen Gesteinskörnungen	16
2.2.8 Prüfverfahren	17
2.2.8.1 Ausbreitfließversuch für Leim und Mörtel	17
2.2.8.2 Trichterauslaufzeit-Versuch für Mörtel	19
2.2.8.3 Fließversuch für Beton	20
2.2.8.4 U-Kasten-Versuch	20
2.2.8.5 L-Kasten Versuch	21
2.2.8.6 Blockring Versuch	22
2.3 Leichtbeton	23
2.3.1 Geschichte des Leichtbetons	23
2.3.2 Grundlagen des Leichtbetons	25
2.3.3 Mischungsentwurf	28
2.3.4 Auswahl der Zuschläge	29
2.3.5 Technologie	29
2.3.6 Leichtzuschläge	31
2.4 Selbstverdichtender Leichtbeton Sachstandsbericht	35
3 Vorversuche und Versuchsplanung	37
3.1 Allgemeines	37
3.2 Mischungsentwurf	39
4 Versuche und Auswertungen	40
4.1 Leimversuche – Bestimmung des Wassergehalts	40
4.1.1 Optimaler Wassergehalt Versuchsreihe 1 bis 4	40
4.1.2 Rheologie	46
4.1.3 Optimaler Wassergehalt Versuchsreihe 5 bis 11	47

4.2	Mörtelversuche.....	57
4.2.1	Erster Mörtelversuch ohne Fließmitteleinsatz.....	57
4.2.2	Mörtelversuch mit Fließmittel aber ohne Granulat Versuchsreihe 2 bis 7	59
4.2.3	Mörtelversuch mit Granulat – Versuchsreihe 8-11	65
4.2.4	Kontrolle der Fließzeit	70
4.2.5	Aufschwimmkontrolle	71
4.3	Betonversuche - Versuchsreihe 1 bis 11	75
4.3.1	Stabilisierer	88
4.3.2	Betonversuche mit Stabilisierungsmittel- Versuchsreihe 12 bis 14	88
4.4	Bestimmung der Betonfestigkeit.....	92
4.5	Versuche zur Steigerung der Betonfestigkeit - Versuchsreihe 15 bis 20.....	97
4.6	Bestimmung der Betonfestigkeit an optimierter Mischung	104
4.7	Betonversuch zur Reduzierung der Dichte - Versuchsreihe 21.....	109
4.8	Bestimmung der Betonfestigkeit an Dichteoptimierter SVLB- Proben.....	110
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	116
6	Literaturverzeichnis	120
7	Abbildungsverzeichnis.....	121
8	Tabellenverzeichnis.....	124
9	Formelverzeichnis	127

1 Einleitung

Durch die vielen Vorzüge des Betons im Bauwesen, kommt ihm heutzutage eine große Bedeutung im Ingenieurbau zu. Dazu gehören seine nahezu unbegrenzte Gestaltungsmöglichkeit, seine hohe Leistungsfähigkeit bei Druckbeanspruchung, seine große Steifigkeit sowie seine günstigen Eigenschaften hinsichtlich Schall-, Brand und Korrosionsschutz. Die Nachteile des Baustoffes sind seine große Wärmeleitfähigkeit und sein großes Raumgewicht. Normalbeton hat eine Trockenrohddichte von 2000 bis 2600 kg/m³. In Abhängigkeit von den verwendeten Zuschlägen schwankt die Rohddichte meist zwischen 2300 bis 2400 kg/m³. Für gewisse Anwendungen im Bauwesen ist es aber aus wirtschaftlichen oder auch aus statischen Gründen unumgänglich, einen leichteren Beton als Normalbeton zu verwenden, einen sogenannten Leichtbeton [5]. Gemäß österreichischer Betonnorm wird Beton mit einer Rohddichte zwischen 800 und 2000kg/m³ als Leichtbeton bezeichnet [11]. Leichtbeton wird aus einem Gemenge von Zement, Wasser und einem oder mehreren Leichtgesteinskörnungen hergestellt. Solche Leichtgesteinskörnungen sind u.a.:

- Blähton
- Blähglas
- Ziegelsplitt
- Holz
- Polystyrol
- Luft etc.

Durch das niedrige Raumgewicht werden die statischen und bauphysikalischen Eigenschaften beeinflusst. Grundsätzlich gilt, bei höherem Raumgewicht erhält man eine höhere Festigkeit und bei geringerem Raumgewicht erhält man eine bessere Wärmedämmung [1].

Eine weitere technische Entwicklung des Betons ist der sogenannte „Selbstverdichtende Beton“. Er ist üblicherweise ein Normalbeton, der nur unter dem Einfluss der Schwerkraft, bis zum vollständigen Niveaugleich entmischungsfrei fließt, ohne, dass ihm zusätzliche Verdichtungsenergie zugeführt wird. Er ist in der Lage bei Bauteilen mit anspruchsvoller Geometrie, jeden Hohlraum selbständig auszufüllen und dabei zu entlüften [6]. Seine guten Eigenschaften kommen besonders bei der Herstellung von

- Sichtbetonbauteilen aufgrund hoher Oberflächenqualität (Stützen, Balken, etc.)
- Wasserbauwerken aufgrund des sehr dichten Gefüges
- hohen Wandbauteilen
- großen Deckenabschnitten
- Betonfertigteilwerken etc.

zur Geltung.

Ziel dieser Arbeit ist es die Vorzüge beider „Betone“ zu kombinieren und einen Beitrag zur Entwicklung eines selbstverdichtenden Leichtbetons zu leisten. Ein derartiger Beton wurde bereits in Deutschland entwickelt, dennoch befindet sich dieser noch in seiner Entwicklungsphase, was der Anstoß für diese Arbeit war [26].

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut:

Zunächst werden die Grundlagen, die Herstellungs- und Prüfverfahren über selbstverdichtenden Beton und Leichtbeton, sowie deren Vor- und Nachteile angeführt. Danach folgt der Versuch, die jeweiligen Vorteile in einem gemeinsamen sogenannten selbstverdichtenden Leichtbeton zusammenzufassen und die jeweiligen Nachteile auszuschließen.

Ein solcher Beton könnte in der Zukunft im Bauwesen von großer Bedeutung sein.

2 Grundlagen

2.1 Beton Geschichte

Die Kenntnisse und das Wissen um die frühgeschichtlichen Bindemittel, einer Mischung aus Kalk, Ziegelmehl oder Puzzolanerde, reichen sehr weit zurück. So benutzten Handwerker im Osten der heutigen Türkei schon vor 14.000 Jahren Mörtel (lateinisch Mortarium) als Bindemittel, um Ziegelsteine zu mauern. Der Mörtel bestand aus gebranntem Kalk. Die Phönizier vermischten den Mörtel vor 3.000 Jahren mit vulkanischem Gestein. Sie schufen damit ein Material, das sogar unter Wasser aushärtete.

Über die Griechen gelangten diese Erkenntnisse und Techniken ungefähr im 3. Jahrhundert v. Chr. nach Italien, dem damaligen römischen Reich. Das Herstellen druckfester Bauteile aus wasserbeständigem Mörtel und Steinbrocken, welche zusammen in einer Schalung erhärten, erlebte dann im 1. Jahrhundert n.Chr. seinen Durchbruch und wurde zum Maßstab der späten römisch-kaiserlichen Architektur. Der römische Beton, heute auch als "Opus Caementitium" bezeichnet, war geboren. In ganz Europa entstanden in dieser Zeit fantastische und monumentale Bauwerke, die auch nach fast 2.000 Jahren immer noch zu bestaunen sind: Tempel, Theater, Zisternen, Aquädukte, Abwasseranlagen, Thermen, Straßen, Hafenanlagen, Brücken, Tunnel und Wohnhäuser [4].

Einen kurzen Überblick der Betongeschichte liefert die folgende Tabelle 1:

Tabelle 1: Beton Geschichte

1804	Erste Betonrohre werden in Frankreich als Fertigteile hergestellt.
1824	Der englische Maurer <i>Joseph Aspdin</i> brannte auf der südenglischen Halbinsel Portland eine Mischung aus Ton und Kalk zu Zement.
1844	Der Engländer <i>Isaac Charles Johnson</i> brachte die Mischung aus Ton und Kalk zum Schmelzen, sie sinterte: Der heute gebräuchliche Portland-Zement war erfunden.
1849	Der französische Gärtner <i>Joseph Monier</i> stabilisierte Blumenkübel, indem er Beton mit einem Stahlgeflecht („Moniereisen“) verband.
1850	In Buxtehude wurde der erste deutsche Portlandzement hergestellt.
1850 bis 1870	Zwischen 1850 und 1870 wird in Deutschland die Produktion von Betonrohren aufgenommen.
1868	<i>W. Michaelis</i> legte in seinem Buch „Die hydraulischen Mörtel“ die günstigste Zusammensetzung des Rohstoffgemisches fest.
1882	<i>G. Prüssing</i> setzte dem Portlandzement granulierten Hochofenschlacke zu.
1890	Der deutsche Ingenieur <i>C.F.W. Döhring</i> ließ sich die Erfindung des Spannbetons patentieren. Die der Armierung dienenden Stahlseile werden im Stahlbeton dabei künstlich gespannt.

1902	In den USA entsteht das erste Eisenbeton-Hochhaus der Welt (16-stöckiges Ingalls Building, Cincinnati, Eisenbeton-Skelettbau).
1903	Der Bauunternehmer <i>Jürgen Hinrich Magens</i> beschäftigte sich intensiv mit dem Verfahren, fertig gemischten Beton über längere Zeit aufzubewahren. Dazu kühlte er den Beton sofort nach dem Mischen stark ab. Sein Verfahren ließ er sich 1903 patentieren und nannte sein Produkt "Transportbeton". Sein Patent war die Basis für das erste Transportbetonwerk der Welt, welches <i>Magens</i> 1903 in Hamburg gründete.
1912	Im österreichischen Zementwerk Lorüns (Vorarlberg) wurde der erste Zement mit hoher Anfangsfestigkeit, zunächst hochfester Zement genannt, hergestellt Vorgefertigte Mehrgeschossbauten bei denen alle Konstruktionsteile aus Eisenbeton vorgefertigt sind, werden von <i>John E. Conzelmann</i> zum Patent angemeldet.
1926	<i>Deniau</i> entwickelt den Innenrüttler, der eine bessere Verdichtung und eine höhere Festigkeit des Betons ermöglichte.
1929	Bau der ersten Stahlbetonstraße mit Bewehrung aus Betonstahlgewebe.
1930	Entwicklung der ersten Tiefbauzemente, die unter höheren Temperaturen und Drücken erst nach längerer Zeit ansteifen und erstarren.
1948	Erste moderne Spannbetonbrücke in Westdeutschland (Kanalhafenbrücke, Heilbronn).
1954	Der weltweite Siegeszug des Transportbetons begann erst nach dem zweiten Weltkrieg, nach der Entwicklung der Transportfahrzeuge zum modernen Fahrmischer. Zunächst in den USA und ab 1954 in Europa, entstanden tausende von Transportbetonwerken, die rund 50 % der gesamten Zementproduktion abnehmen.
1968	In den USA wurde Schnellzement („Regulated Set Cement“) zum Patent angemeldet
1978/79	Stahlfaserbeton kommt in Deutschland als Neuheit zum Einsatz: als Stahlfaserpumpbeton bei der Herstellung eines Hauptsammlers in Hamburg und als Stahlfaserspritzbeton beim Bau einer Tiefgarage.
Heute	Ist Beton ein Hightech-Produkt, die Betontechnologie entwickelt sich stetig weiter. Selbstverdichtender Beton und lichtdurchlässiger Beton sind die jüngsten und spektakulärsten Beispiele einer Entwicklung, deren Ende noch lange nicht in Sicht ist. Eine weitere neue Technologie ist der ultrahochfeste Beton. Dieser befindet sich allerdings noch in der Entwicklungsphase.

2.2 Selbstverdichteter Beton

2.2.1 Geschichte

Die Idee zur Entwicklung eines selbstverdichtenden Betons, (SVB) der wie Honig fließt ist schon sehr alt (Siehe Abb.1).



Abb.1: links Honig beim fließen [12], rechts Gegenüberstellung von Honig und SVB Beton [9]

In den USA wurden bereits vor mehr als 70 Jahren sehr fließfähige Betone (so genannter Gussbetone) eingebaut, die selbstverdichtend und selbstnivellierend waren. Allerdings war die Dauerhaftigkeit dieser Betone eher gering, weil ihre hohe Fließfähigkeit nur durch einen erhöhten Wassergehalt (hoher w/z-Wert (=Wasser/Zement-Wert)) erreicht wurde.

Der uns heute bekannte selbstverdichtende Beton fand seinen Ursprung in den 1980er Jahren in Japan. Durch den Bauboom und den damit einhergehenden Betonbedarf wurde schnell ein Fachkräftemangel am Arbeitsmarkt erreicht, der dazu führte, dass die Verarbeitung und Verdichtung des Betons nicht ordnungsgemäß durchgeführt wurde. Daher begann man in Japan bereits recht früh mit der Entwicklung von selbstverdichtendem Beton, um die Fehlerquote in der Herstellungsphase zu minimieren.

1990 wurden in Japan erste Großprojekte mit SVB ausgeführt. Die ersten Europäischen Länder welche mit SVB arbeiteten waren Frankreich und Schweden 1996. Die erste deutsche Richtlinie für SVB wurde 2003 veröffentlicht (Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb). Seit 2008 liegt eine Ergänzung der europäischen Betonnorm vor (DIN EN 206-1; DIN EN 206-9) [3].

2.2.2 Grundlagen des selbstverdichtenden Betons

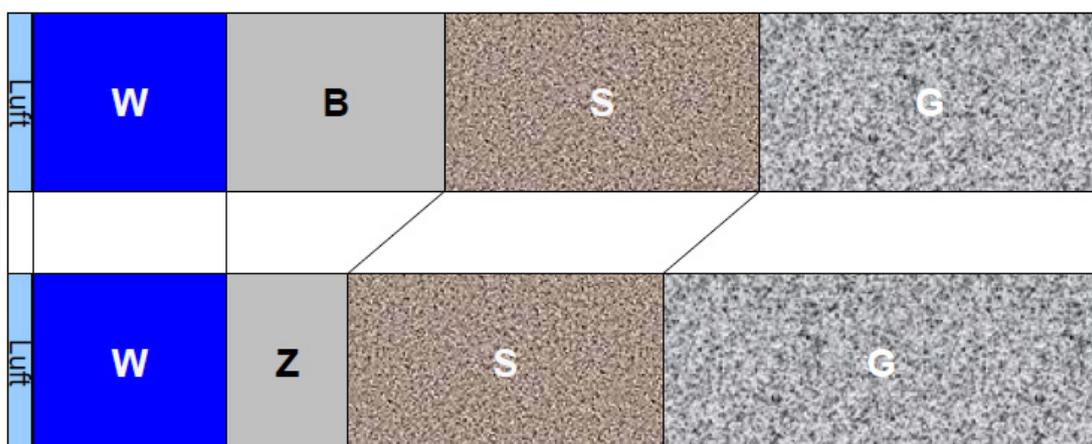
Selbstverdichtender Beton, ist ein Beton, der alleine durch die Schwerkraft ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie (z.B. Rüttler oder Vibrator) in die vorhandene Schalung

eingebaut wird und von alleine verdichtet. Der Beton entlüftet sich selbstständig und füllt jeden Hohlraum innerhalb der Schalung und Bewehrung vollständig aus. Durch die Zugabe von Hochleistungsbetonverflüssigern ist es möglich, eine sehr fließfähige Konsistenz des Betons zu erreichen. Aufgrund dieser hervorragenden Fließigenschaften ergeben sich beim Einsatz von selbstverdichtetem Beton ökologische, soziale und ökonomische Vorteile. Ein ökologischer Vorteil ist die Nutzung von industriellen Nebenprodukten wie z.B. Flugasche. Ein weiterer ökologischer Vorteil ist auch die nicht mehr erforderliche Rüttelplatte und die daraus entstehende Lärmemission, welche auch im sozialen Bereich zu besseren Arbeitsbedingungen führen. Ökonomisch gesehen bietet der selbstverdichtete Beton mehr Vor- als Nachteile, auch wenn der erhöhte Aufwand bei der Herstellung und die höheren Materialkosten ungünstig sind. Vor allem die verbesserte Oberflächenqualität und der geringe Aufwand beim Einbringen des Betons in die Schalung wirken sich positiv aus. Damit es im SVB nicht zum Entmischen kommt, darf der Frischbeton folgendes nicht aufweisen:

- Sedimentation: Große Gesteinskörner sinken ab. Wasser sondert sich ab (Bluten).
- Separation: Die großen Gesteinskörnungen können von der Matrix des Betons nicht mehr transportiert werden.

Durch eine veränderte Betonzusammensetzung werden die gewünschten Eigenschaften des SVB erreicht. Abb.2 zeigt den Unterschied der Betonzusammensetzung zwischen einem SVB und einem Rüttelbeton.

Selbstverdichtender Beton



Rüttelbeton

Abb.2: Vergleich der Zusammensetzung eines konventionellen Rüttelbetons und eines SVB (W: Wasser; B: Bindemittel; Z: Zement; S: Sand; G: grobe Gesteinskörnung) [3]

Eine derartige Zusammensetzung des Mörtels und Zementleimes- damit die Gesteinskörnungen in Schwebelage gehalten werden können- bildet das Grundkonzept des SVB. *Hajime Okamura* verwirklichte diese Idee durch eine sehr exakte Sieblinienoptimierung. Das Konzept, welches der Idee von *Okamura* zugrunde liegt, besteht

in der dichtesten Packung der Feststoffpartikel, angefangen vom feinsten Bestandteil des Bindemittels bis hin zum Größtkorn der Gesteinskörnung. Da Mischungen mit einer solchen Kornverteilung sehr schwer verarbeitbar sind, benötigte man extrem wirksame verflüssigende Zusatzmittel mit möglichst zusätzlich stabilisierender Wirkung. Bei der Entwicklung des sogenannten Gussbetons in den 70er Jahren erkannte man bereits, dass ein stabiles Gefüge des Frischbetons durch die Auswahl der richtigen Sieblinie positiv beeinflusst wird. Auch bei der Zusammensetzung der Gesteinskörnungen in Bezug auf den Zementleimgehalt wurde schon früh erkannt, dass in Abhängigkeit der Sieblinie der Gesteinskörnungen der Bedarf an Zementleim gesteuert werden kann. Dabei ist noch zu bemerken, dass scharfkantige Zuschlagstoffe mehr Zementleim zu ihrer Verleimung benötigen als rundkörnige. Als Idealsieblinie wurde schon damals wie heute die sogenannte *Fuller-Kurve* angestrebt (siehe Abb.3). Entspricht die Sieblinie der gewollten Gesteinskörnung, der *Fuller-Kurve*, so ist der Hohlraum Gehalt (theoretisch) am geringsten [8] [3].

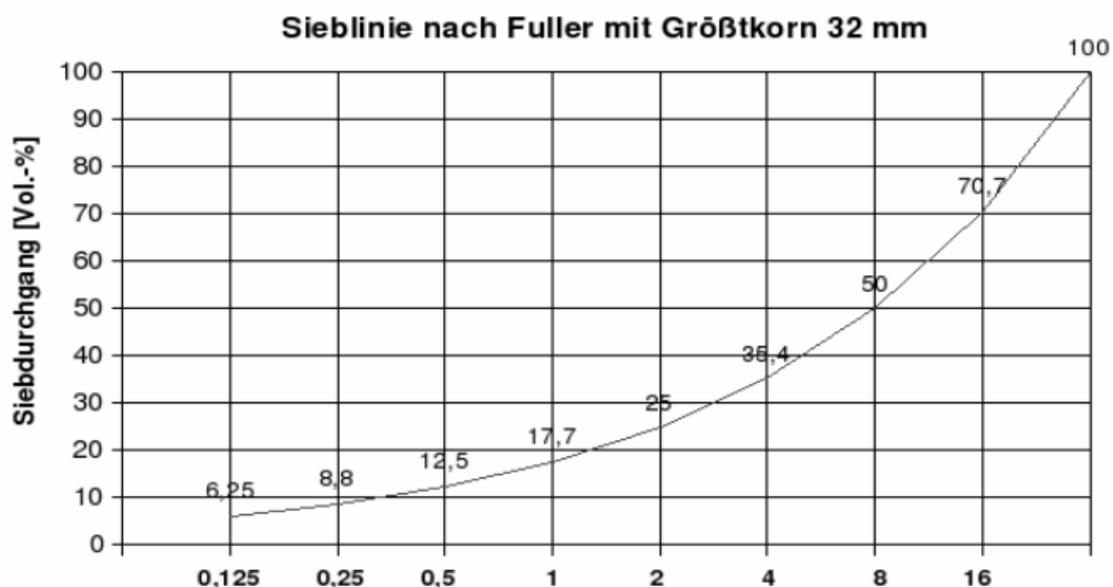


Abb.3: Sieblinie nach Fuller [7]

2.2.3 Wahl der Ausgangsstoffe

Eine fließfähige Mörtelmatrix und ein deutlich reduzierter Grobkorngehalt bilden die Grundlage der Frischbetoneigenschaften des SVB. Der Zement und die Zusatzstoffe mit einem Korndurchmesser $d < 0,125$ mm werden Mehlkorn genannt. Das Mehlkorn bildet zusammen mit Wasser und Fließmittel die tragfähige Suspension, den sogenannten Leim, in welchem die Gesteinskörnungen schwimmen. Durch einen erhöhten Mehlkorngehalt oder durch die Zugabe eines Stabilisierers, kann die schwimmende Eigenschaft der Gesteinskörnung erreicht werden. SVB kann in drei Typen unterteilt werden (Tabelle 2):

Tabelle 2: Mehlkorngelalt der SVB-Typen

SVB-Typ	Mehlkorngehalt [kg/m ³]
Mehlkornotyp	550-650
Stabilisierertyp	350-500
Kombinationstyp	Abhängig von der Stabilisiererzugabe

Diese 3 Typen unterscheiden sich voneinander durch den Mehlkorngelalt und durch die Menge der Stabilisierermasse. Ein optimal abgestimmtes Verhältnis von Mehlkorn-, Wasser- und Fließmittelmenge, sowie eine geeignete Zusammensetzung des Mehlkorns ist für das ausreichende Fließvermögen und für den Zusammenhalt der Bestandteile unverzichtbar. Der Wasseranspruch und die daraus folgenden Frischbetoneigenschaften verändern sich, bei einer alternativen Zusammensetzung des Mehlkorns (z.B. Flugasche statt Gesteinsmehl). Die erhöhte Wasserdosierung wirkt sich auf das Fließ- und das Zusammenhaltevermögen des Betons aus. Anstatt eines besseren Fließverhaltens kann es dadurch zu einem schlechteren Zusammenhalt und zu einem instabilen Frischbetongefüge führen.

Die Fließgrenze und die Viskosität werden durch den Wassergehalt und der Fließmittelmenge unterschiedlich beeinflusst. Durch eine vermehrte Zugabe von Wasser werden die Fließgrenze und die Viskosität vermindert, während eine steigende Fließmittelmenge die Fließgrenze herabsetzt (siehe Abb.4).

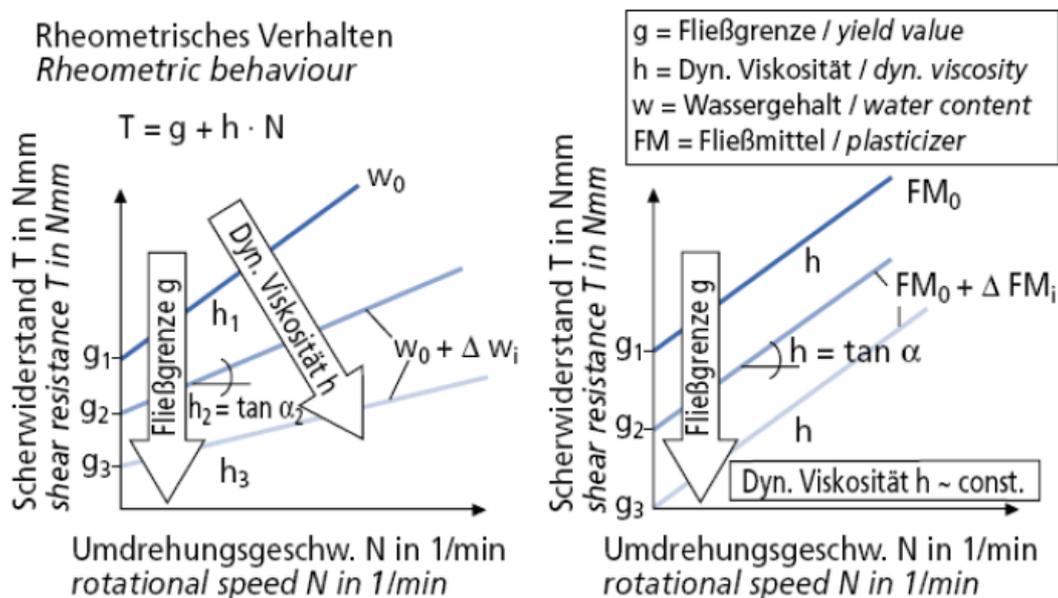


Abb.4: Einfluss von Zugabewasser und Fließmittel auf die rheologischen Eigenschaften von Zement- bzw. Mehlkornsuspension [3]

Als Mehlkorn werden neben Zement auch Flugasche, Kalksteinmehl oder Quarzmehl eingesetzt. Eine Kombination der drei Stoffe wird ebenfalls häufig verwendet. Andere mahlfeine Betonzusatzstoffe wie Hüttensand und Silikastaub sind ebenfalls möglich. Die

Fließfähigkeit kann durch einen zu hohen Anteil an sehr feinen Partikeln herabgesetzt werden. Das verwendete Mehlkorn beeinflusst neben den rheologischen Eigenschaften auch das optische Erscheinungsbild der Betonoberfläche. Zum Beispiel führt Flugasche zu einer dunkleren Oberfläche als Kalkstein und Quarzmehl [3].

2.2.4 Mischungsentwurf

Ziel des Mischungsentwurfes ist es die gewünschten und geplanten rheologischen Eigenschaften zu erreichen. Allerdings müssen auch die geforderten Festbetoneigenschaften erfüllt werden. SVB wird, anders als Normalbeton, durchgehend volumetrisch zusammengesetzt. Nach *H. Okamura* und *K. Ozawa* lässt sich SVB durch aufeinander aufbauende Leim-, Mörtel- und Betonversuche entwerfen. In Abb.5 ist das japanische Ablaufschema für den Entwurf eines SVB dargestellt [6].

Der angestrebte Luftgehalt, sowie die Festlegung der Zieleigenschaften der Ausgangsstoffe bilden den ersten Schritt des Entwurfs. Danach wird das Zuschlagvolumen über den Grob- und Feinzuschlag bestimmt [6].

2.2.5 Festlegung des Luftgehalts

Der erste Schritt ist die Festlegung des Luftgehaltes V_a . Der Anteil der Luft im Frischbeton von SVB schwankt erheblich. Im Wesentlichen hängt der angenommene Wert von der Erfahrung des Betonherstellers ab. Eine Überprüfung und gegebenenfalls eine Korrektur sollte nach der Betonherstellung auf jeden Fall durchgeführt werden. Die gewünschten Luftporen entstehen durch sogenannte Luftporenbildner. Diese erzeugen Millionen von kleinen Luftporen mit etwa 0,01 bis 0,3 mm Durchmesser. Beim Erreichen des Gefrierpunktes bieten diese Luftporen dem Wasser die Möglichkeit sich auszudehnen, dadurch wird ein abplatzen der Betonoberfläche verhindert. Verschiedene Angaben, welche in der Literatur zum Luftporengehalt in Frischbeton zu finden sind, sind in Tabelle 3 angegeben. Dies ist allerdings nur eine grobe Einteilung, da der Luftporengehalt von sehr vielen Parametern abhängig ist, wie zum Beispiel der Zementart, der Gesteinskörnung, der Kornzusammensetzung, der Konsistenz, der Temperatur, der Mischintensität und der Mischdauer. Die meisten Quellen beziffern den Luftporengehalt mit 1 bis 2%.

Tabelle 3: Luftporengehalt im Frischbeton nach verschiedenen Quellen

Autor /Quelle	Luftporengehalt
http://www.beton.org	1-2%
http://www.heidelbergcement.com	1-2%
http://de.wikipedia.org	3-8%

2.2.6 Volumen der groben Gesteinskörnungen

Das lose Schüttvolumen entspricht in der Regel 50% des luftfreien Betonvolumens (siehe Abb.5 links). Um das zu erreichen wird der Gehalt an groben Gesteinskörnungen V_g variiert (siehe Formel 1).

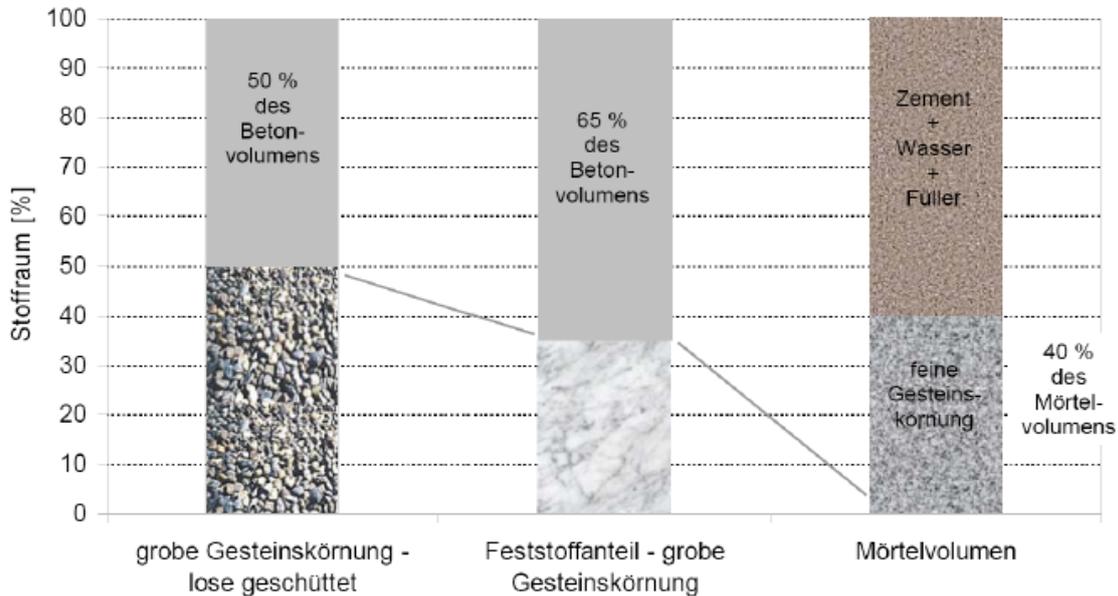


Abb.5: Mischungsentwurf nach Okamura [3]

Formel 1: Berechnung der groben Gesteinskörnung

$$V_g = 0,5 \dots 0,6 \cdot (1 - V_a) \cdot \frac{\rho_{gs}}{\rho_g}$$

V_g Volumen grobe Gesteinskörnung [m^3]
 V_a Volumen Luft [m^3]
 ρ_g Rohdichte grobe Gesteinskörnung [g/cm^3]
 ρ_{gs} Schüttdichte grobe Gesteinskörnung [g/cm^3]

2.2.7 Volumen für die feinen Gesteinskörnungen

Das Volumen der feinen Gesteinskörnungen $V_{s \geq 0,125}$ wird auf 40% des Mörtelvolumens festgelegt (siehe Abb.5 rechts). Es errechnet sich zu:

Formel 2: Berechnung der feinen Gesteinskörnung

$$V_s = \frac{0,4 \cdot (1 - V_a - V_g)}{1 - \frac{R_{s < 0,125}}{100}}$$

V_s Volumen feine Gesteinskörnung gesamt [m^3]
 $V_{s \geq 0,125}$ Volumen feine Gesteinskörnung $d \geq 0,125$ mm [m^3]
 $V_{s < 0,125}$ Volumen feine Gesteinskörnung $d < 0,125$ mm [m^3]
 $R_{s < 0,125}$ Volumenanteil der feinen Gesteinskörnung $d < 0,125$ mm [Vol.-%]
 V_g Volumen grobe Gesteinskörnung [dm^3/m^3]
 V_a Volumen Luft [dm^3/m^3]

$$V_s = V_{s \geq 0,125} + V_{s < 0,125}$$

2.2.8 Prüfverfahren

2.2.8.1 Ausbreitfließversuch für Leim und Mörtel

Zur Bestimmung der Fließfähigkeit für Leim und Mörtel wird der Ausbreitfließversuch durchgeführt. Zur Durchführung der Prüfung wird ein Konus (nach Hägermann, siehe Abb.6), auf eine saubere, glatte und mattfeuchte Oberfläche (Siehe Abb.6) gestellt und mit Leim oder Mörtel bis zum Rand gefüllt [6].

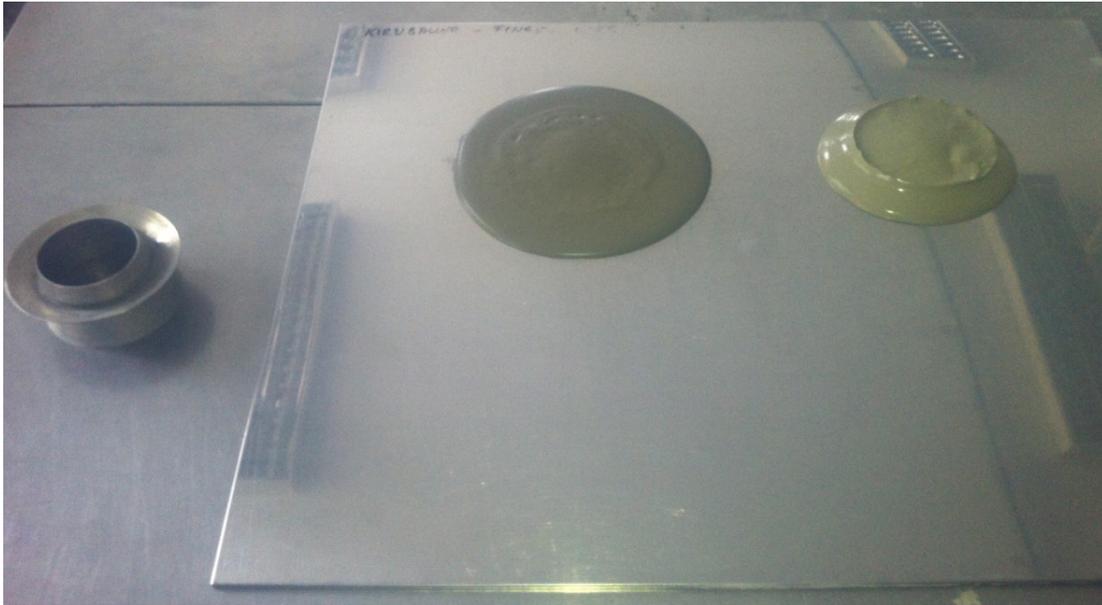


Abb.6: links Hägermann Konus; rechts saubere, glatte und mattfeuchte Oberfläche

Um den Leim oder Mörtel zum fließen zu bringen wird der Konus nach oben gezogen. Die Suspension fließt nun nur durch die Wirkung der Schwerkraft auf die vorbereitete Oberfläche. Zur Beschreibung der Fließfähigkeit wird die Größe des gebildeten Ausbreitkuchens gemessen. Mit der Messung des Durchmessers in die X und Y Richtung lässt sich das Verhältnis der Vergrößerung zur Öffnungsfläche des Konus berechnen (siehe Abb.7) [6].



Abb.7: links: Austritt des Leims oder Mörtels; rechts: Messung des Durchmessers

Dieses Verhältnis wird als Ausbreitfließkennwert Γ bezeichnet. Der Index m oder l gibt an um welche geprüfte Substanz es sich handelt: m für Mörtel und l für Leim. Die geometrischen Abmessungen des Konuses nach *Hägermann* sind in Abb.8 dargestellt. [6].

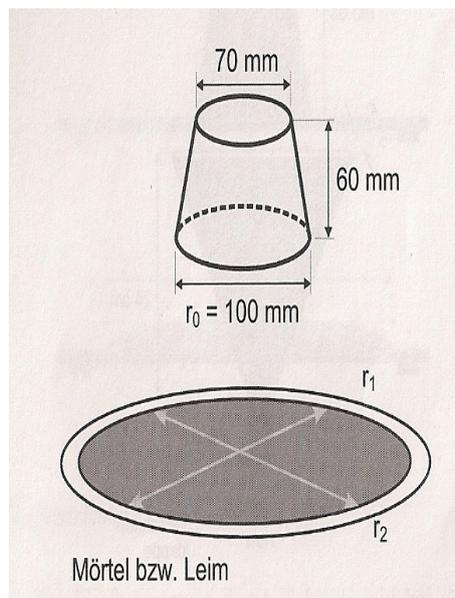


Abb.8: Skizze Konus nach *Hägermann* und Ausbreitfläche [6]

Entspricht r dem mittleren Durchmesser des Ausbreitkuchens, dann errechnet sich der Ausbreitfließkennwert Γ_m (für Mörtel) bzw. Γ_l (für Leim) wie folgt:

Formel 3: Berechnung des mittleren Durchmessers

$$r_m \text{ bzw. } r_l: r = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

Formel 4: Berechnung des Ausbreitmaßes

$$\Gamma_m \text{ bzw. } l = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 1$$

Als Ergebnis des Versuches wird bei einem SVB ein Γ_m Wert nach *Okamura* von 5 angestrebt. Unter Verwendung des Konuses nach *Hägermann* entspricht dies einem Ausbreitdurchmesser von 24,5 cm. Bei den Leimversuchen wird kein bestimmter Zielwert als Voraussetzung vorgegeben. Vielmehr wird bei ihnen der optimale Wassergehalt/Bindemittel Wert bestimmt [6].

2.2.8.2 Trichterauslaufzeit-Versuch für Mörtel

Der Trichterauslauf-Versuch dient dazu, um die Viskosität des Mörtels zu bestimmen. Der Auslauftrichter der für den Versuch verwendet wird ist in Abb.9 mit seinen geometrischen Abmessungen zu erkennen.

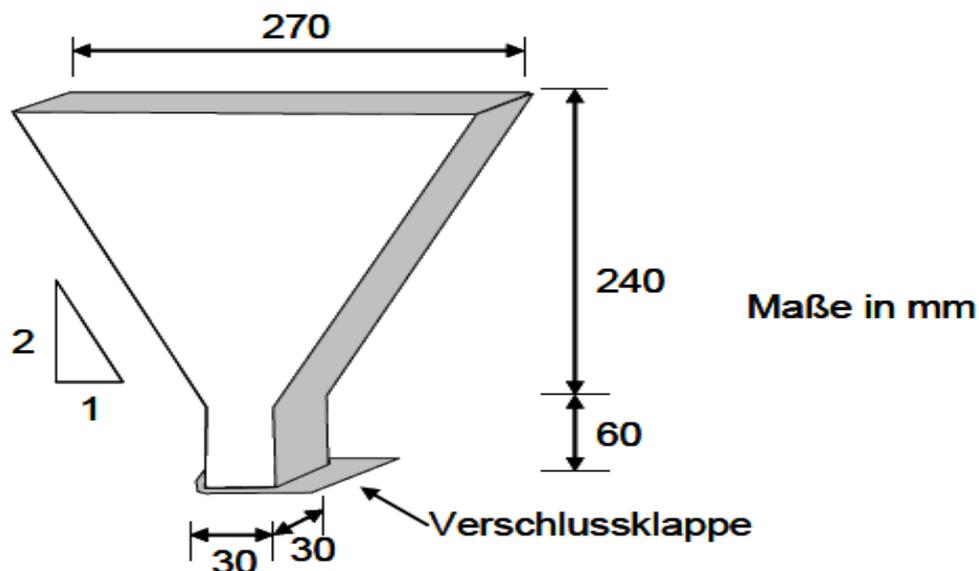


Abb.9: Trichterauslaufzeit- Versuch für Mörtel [3]

Der Trichter muss auf der Innenseite sauber und mattfeucht sein. Er wird bis zum Rand mit Mörtel gefüllt, anschließend wird der Trichter am Boden geöffnet und es wird die Zeitdauer gemessen, die der Mörtel benötigt um aus dem Trichter auszulaufen. Je länger die Auslaufzeit des Mörtel, desto höher ist seine Viskosität. Als Messgröße bei der Bestimmung der Auslaufzeit wird der R_m -Wert verwendet. Er errechnet sich nach folgender Formel [6]:

Formel 5: Messgröße für Trichterauslauf-Versuch

$$R_m = \frac{10}{t}$$

2.2.8.3 Fließversuch für Beton

Mit diesem Versuch wird die Fließfähigkeit des Betons untersucht. Durchgeführt werden kann der Versuch mit dem Setztrichter (siehe Abb.10) oder mit dem Kegelstumpf. Wird bei dem Versuch der Setztrichter verwendet dann bezeichnet man das Ergebnis als Setzfließmaß, wird der Kegelstumpf verwendet, dann bezeichnet man das Ergebnis als Aubreitfließmaß. Zur Prüfung benötigt man einen ausreichend großen, sauberen und mattfeuchten Ausbreittisch, auf dem der Trichter mit voller Betonfüllung zu positionieren ist. Danach wird der Trichter angehoben, sodass der Beton nur unter Wirkung der Schwerkraft auseinanderfließen kann. Der mittlere Durchmesser des Ausbreitkuchens gilt als Fließmaß.

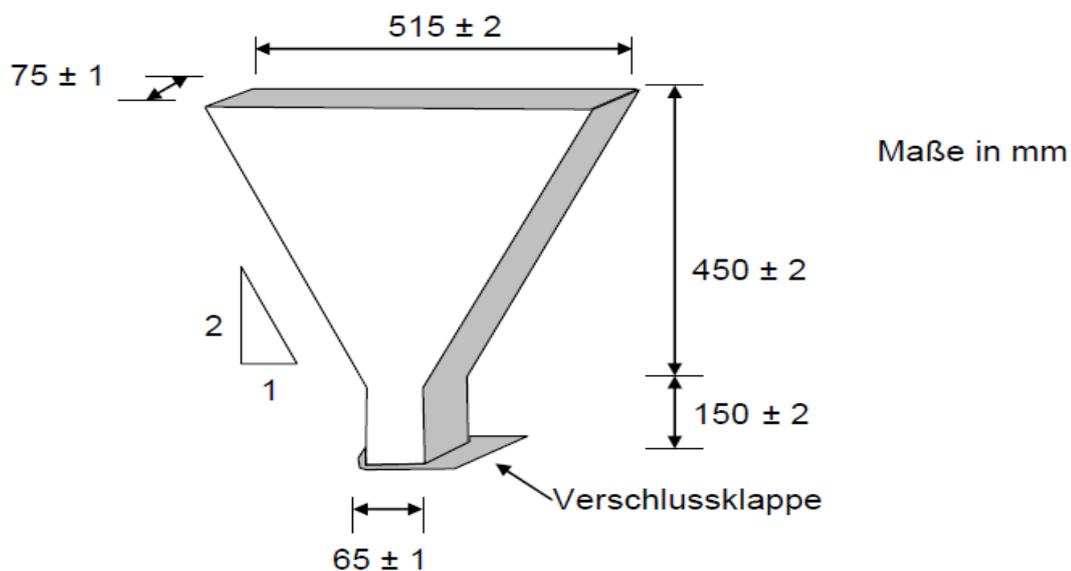


Abb.10: Setztrichter zur Bestimmung des Setzfließmaßes [3]

Das Setzfließmaß ist aufgrund des größeren Volumens im Trichter im Allgemeinen 5 bis 10 cm größer als das Aubreitfließmaß desselben Betons. Der anzustrebende mittlere Durchmesser sollte für das Setzfließmaß 65 ± 5 cm sein. Der Versuch dient als Laboruntersuchung und als Baustellenüberwachung vor Ort. Zusätzlich kann noch die Zeit bestimmt werden die der Beton benötigt, um nach dem Anheben des Trichters einen Durchmesser von 50 cm zu erreichen [6].

2.2.8.4 U-Kasten-Versuch

Ziel dieses Versuches ist es die Selbstnivellierungsfähigkeit des Betons und seine Neigung zum Blockieren zu untersuchen. Bei diesem Versuch wird ein Behälter verwendet, welcher in der Mitte durch eine Wand getrennt ist und am unteren Teil der Zwischenwand mit einem öffenbaren Schieber versehen ist (siehe Abb.11). Eine der beiden Kammern wird bei geschlossenem Schieber mit Beton gefüllt, während die andere Kammer leer bleibt. Nach Beendigung der Füllung wird der Schieber am unteren Ende der Zwischenwand geöffnet, sodass der Beton in die leere Kammer fließen kann und darin aufsteigt. Als zusätzlicher

Widerstand befinden sich in der Öffnung noch 3 Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 14mm, die gleichmäßig in der Behälterbreite von 20cm verteilt sind. Um die Anforderungen an den SVB Beton zu erhöhen, werden in einigen Fällen auch vier oder mehr Bewehrungsstäbe verwendet. Nach Japanischer Literatur muss der SVB bei dieser Prüfung eine Mindeststeighöhe von 30cm erreichen. Der Versuch dient ebenso wie der Fließversuch als Laboruntersuchung und als Baustellenüberwachung vor Ort [6] [24].

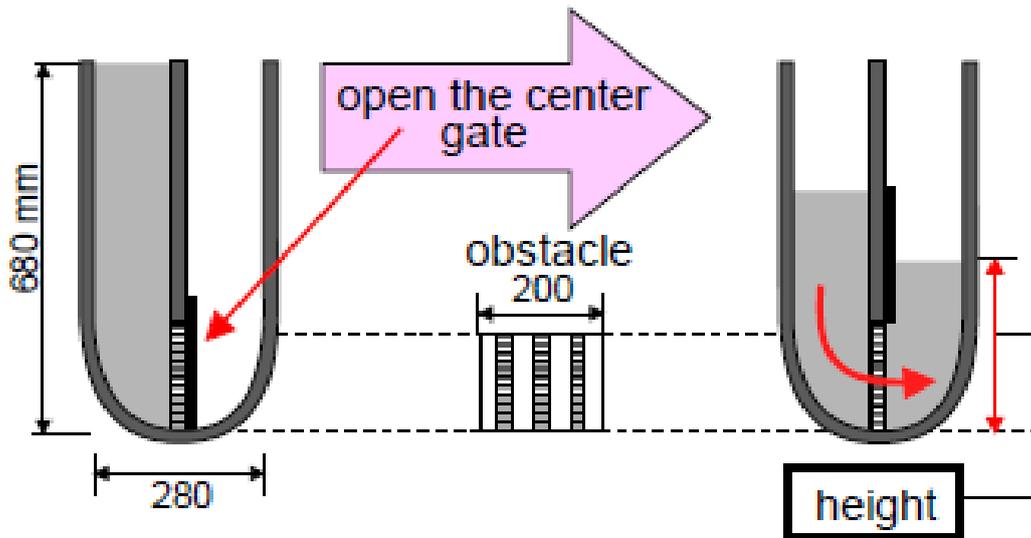


Abb.11:U Kasten für Betonversuch [24]

2.2.8.5 L-Kasten Versuch

Bei diesem Versuch wird die Neigung des Betons zum blockieren sowie seine Selbstnivellierungsfähigkeit geprüft. Zur Prüfung wird, wie in Abb.12 ersichtlich, die Form bei geschlossenem Schieber mit Beton gefüllt. Bei vollständiger Füllung wird der Schieber geöffnet, sodass der Beton alleine durch die Schwerkraft in die horizontale Schalung fließen kann. Als zusätzliches Hindernis muss er dabei in der Regel drei Bewehrungsstäbe überwinden [6].

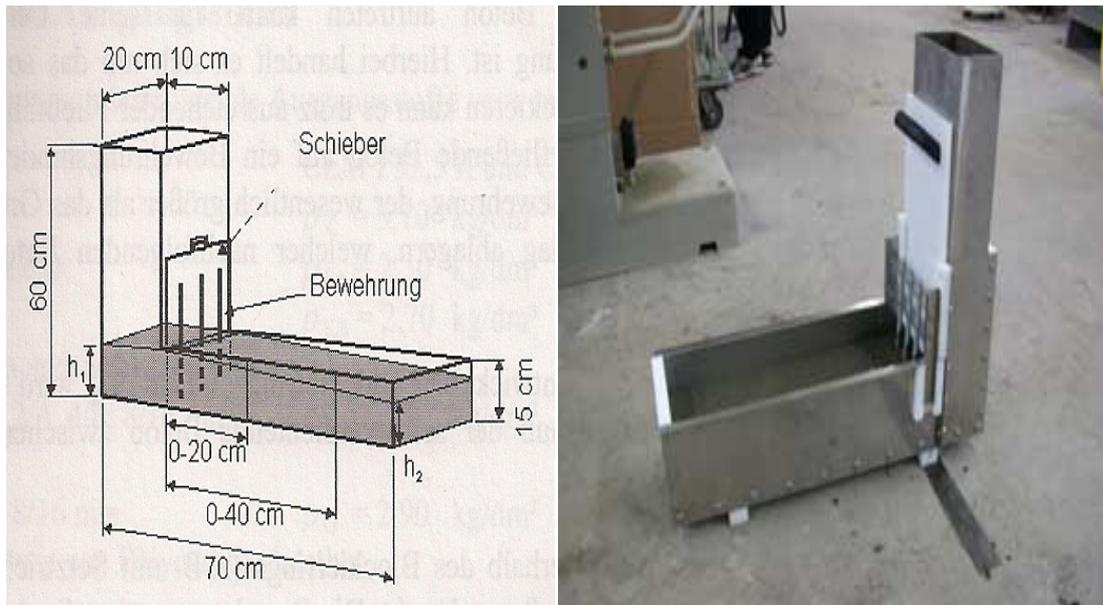


Abb.12: links Abmessungen L Kasten [6] ; rechts Foto L Kasten [13]

2.2.8.6 Blockring Versuch

Im Laufe der Zeit erkannte man, dass es bei selbstverdichtendem Beton dazu kommen kann, dass dieser an den Bewehrungsstäben oder an anderen Hindernissen nicht ungestört vorbei fließen kann. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde der sogenannte Blockring Versuch entwickelt. Der SVB kann auch bei einem Bewehrungsabstand, der wesentlich größer ist als das Größtkorn, groben Zuschlag ablagern, der den nachfolgenden Beton am weiterfließen hindert. Der Blockring ist in Abb.13 dargestellt und hat einen Bewehrungsstabdurchmesser von ca. 16mm. Die Stäbe haben untereinander einen Abstand von ca. dem 2 bis 3 fachen des Stabdurchmessers.

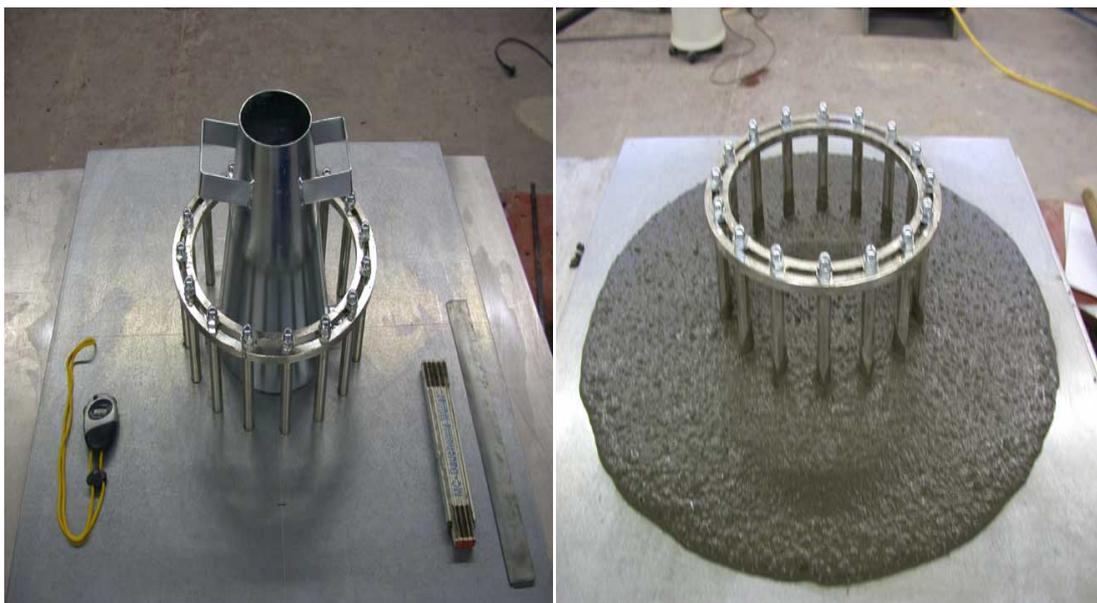


Abb.13: links Blockring mit Trichter [13]; rechts Blockring mit ausgeflossenem Beton [13]

2.3 Leichtbeton

2.3.1 Geschichte des Leichtbetons

Bereits in der Antike wurde das erste Mal ein betonähnliches Gemisch unter Verwendung von leichten Zuschlägen verwendet. Beispiele aus dieser Zeit sind unter anderem das *Pantheon* (siehe Abb. 14 links), bei welchem als Zuschlagstoff Bimsstein eingesetzt wurde oder das *Kolosseum* (Abb. 14 rechts) bei dem Vulkanlava, Ziegelsplitt und Tuffstein verwendet wurde.



Abb. 14: Kolosseum (rechts), Pantheon (links) [7]

Etwas später wurde durch den Erfolg im Schiffsbau der Einsatz des Leichtbetons im konstruktiven Ingenieurbau eingeleitet. Erstmals industriell verwendet wurde Leichtbeton in den 20er Jahren in den USA. Dort entstanden unter anderem das *Park Plaza Hotel* in Saint Louis (1928) (siehe Abb.15) und das Gebäude der *Southwestern Bell Telephone Company* in Kansas City (1928) (siehe Abb.15). 1936 wurde die obere Fahrbahnplatte der *Oakland-Bay-Brücke* in San Francisco aus Leichtbeton hergestellt. Als Leichtgesteinskörnungen wurden Blähschiefer und Natursand gewählt.



Abb.15: Beispiele von Anwendungen von Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau, von links oben nach rechts unten: Park Plaza Hotel, Southwestern Bell Telephone Company, BMW Verwaltungsbau, Skiflugschanze in Oberstdorf [7]

In Europa begann die industrielle Nutzung des Leichtbetons erst im Jahr 1939 in Dänemark. Die erste deutsche Anlage wurde 1956 in Betrieb genommen. Bei den genannten Anwendungen ist neben der hohen Widerstandsfähigkeit auch die Gewichtsersparnis von großer Bedeutung. So wurden im Jahre 1955 die Decken des *Prudential Life Building* in Chicago als Leichtbetondecken errichtet. Das *Statler Hilton Hotel* in Dallas wurde ebenfalls zur gleichen Zeit mit Leichtbetondecken errichtet. Europa, Japan und Australien konnten mit der zügigen Verbreitung und raschen Weiterentwicklung von Leichtbeton in den USA nicht Schritt halten. Die ersten großen Leichtbetonprojekte entstanden erst in den 60er Jahren. Stellvertretend für die Zeit sind der *Commercial Centre Tower* in Kobe der *Australien Square* und das *Centre Square Building* in Sydney [5].

In den frühen 70er Jahren erlebte auch in Deutschland und Österreich der Leichtbeton seine Blütezeit. Aus dieser Zeit stammen unter anderem das BMW Verwaltungsgebäude in München und die Skiflugschanze in Oberstdorf (siehe Abb.15) [5].

2.3.2 Grundlagen des Leichtbetons

Beton mit einer Rohdichte zwischen 800 und 2000 kg/m³ wird als Leichtbeton bezeichnet [11]. Durch unterschiedliche Zuschlagsstoffe, sowie durch Veränderung der Betonstruktur kann die Rohdichte auf dieses Maß reduziert werden. Die geringere Dichte kann also durch das gezielte einbringen von Poren oder durch die Verwendung von Leichtzuschlägen erreicht werden. Die verwendeten Leichtzuschläge haben in den meisten Fällen eine porige Matrix. Damit ergeben sich folgende Einteilungen beim Leichtbeton [2] [10]:

- Kornporigkeit (gefügedichter Leichtbeton)
- Matrixporigkeit
- Haufwerksporigkeit (Schaumbeton)
- Porenbeton.

Porenbeton wird wegen der notwendigen Erhärtung ausschließlich werksmäßig produziert, während die ersten drei Leichtbetone der Aufzählung sowohl als Ort- als auch als Fertigteilbeton verwendet werden. Die geringere Rohdichte des Leichtbetons kann mittels

- Einsatz leichter Gesteinskörnung
- gezielten Hohlräumen zwischen der Gesteinskörnung
- Luftporenbildnern

gewährleistet werden. Es ist auch eine Kombination der drei Möglichkeiten, je nach Notwendigkeit, möglich.

Die geringere Rohdichte von Leichtbeton gegenüber normalem Beton hat auch eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit zur Folge.

Wegen ihrer guten wärmedämmenden Eigenschaft sind haufwerksporige Leichtbetone, die am meisten verbreiteten Leichtbetonprodukte (ohne Porenbeton). Sie kommen bevorzugt in Mauersteinen und Wandtafeln zum Einsatz [20]. Gefügedichter Leichtbeton stellt nur einen kleinen Anteil des Betonbaus dar. Gemessen an seinem leistungspotenzial wird er verhältnismäßig selten verwendet. Die Gründe dafür sind die hohen Materialkosten und die anspruchsvollere Technologie gegenüber dem Normalbeton [21]. In Abb. 16 sind alle Betonarten mit ihren unterschiedlichen Dichten und der dazugehörigen Druckfestigkeit dargestellt.

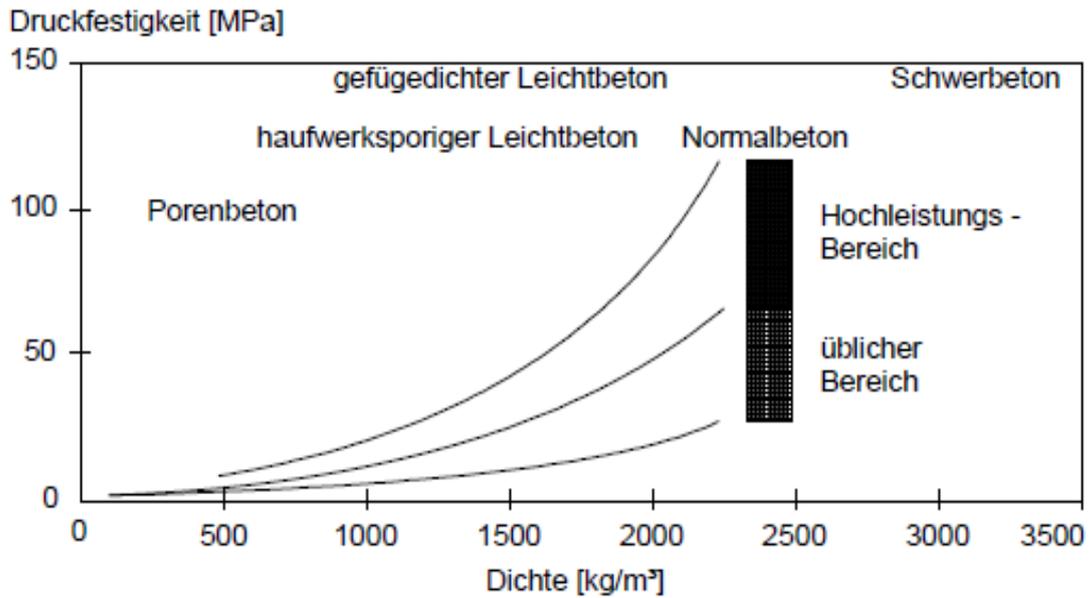


Abb. 16: Festigkeit und Rohdichtebereiche von Beton [21]

Kornporigkeit

Das Gefüge eines konstruktiven Leichtbetons ist ebenso geschlossen wie das Gefüge eines Normalbetons (siehe Abb. 17).

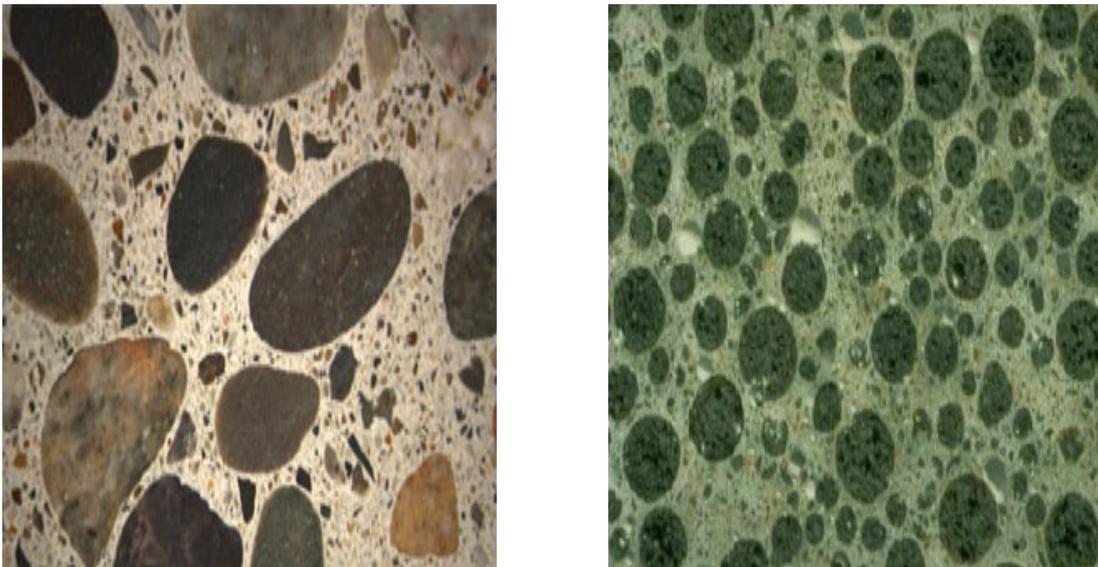


Abb. 17 : Gefüge von Normalbeton [22] (links) und konstruktiver Leichtbeton [3] (rechts)

Durch den Austausch der normalen Gesteinskörnung gegen die porige leichte Gesteinskörnung wird die geringere Rohdichte des konstruktiven Leichtbetons erreicht. Des Weiteren ist es noch möglich die übliche Sandfraktion durch Leichtsand auszutauschen. In Abb. 18 sind die unterschiedlichen Kornrohdsichten der Gesteinskörnungen zu erkennen.

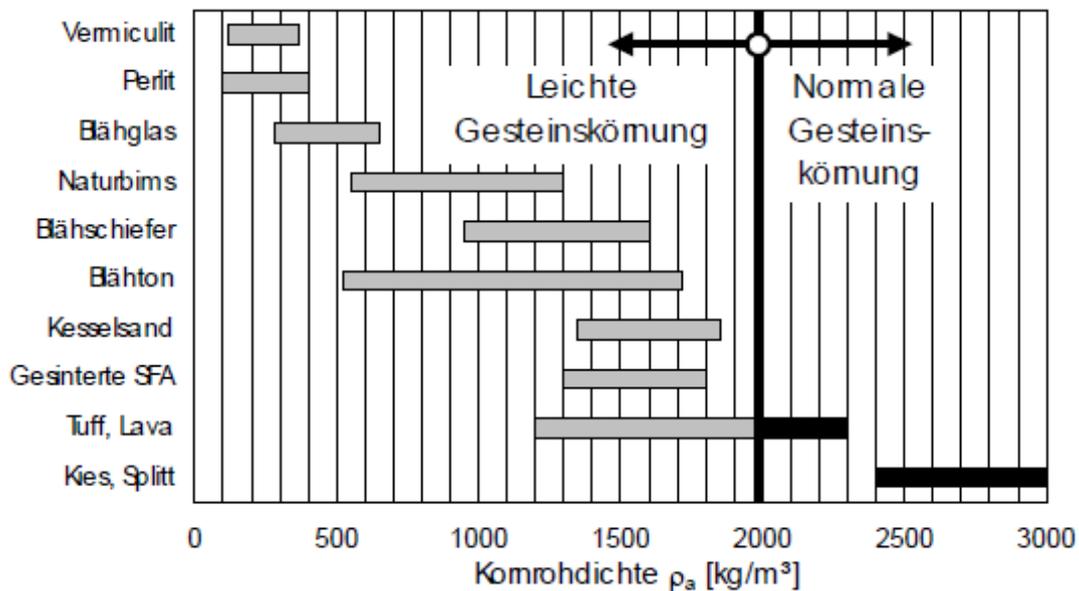


Abb. 18: Kornrohddichten leichter und normaler Gesteinskörnungen [5]

Durch die Verminderung der Betonrohddichte, aufgrund des gezielten Einbaus von Poren, sinken im Allgemeinen die Druckfestigkeit und der E-Modul. In Abb. 19 wird dieser Zusammenhang anhand der Würfeldruckfestigkeit dargestellt.

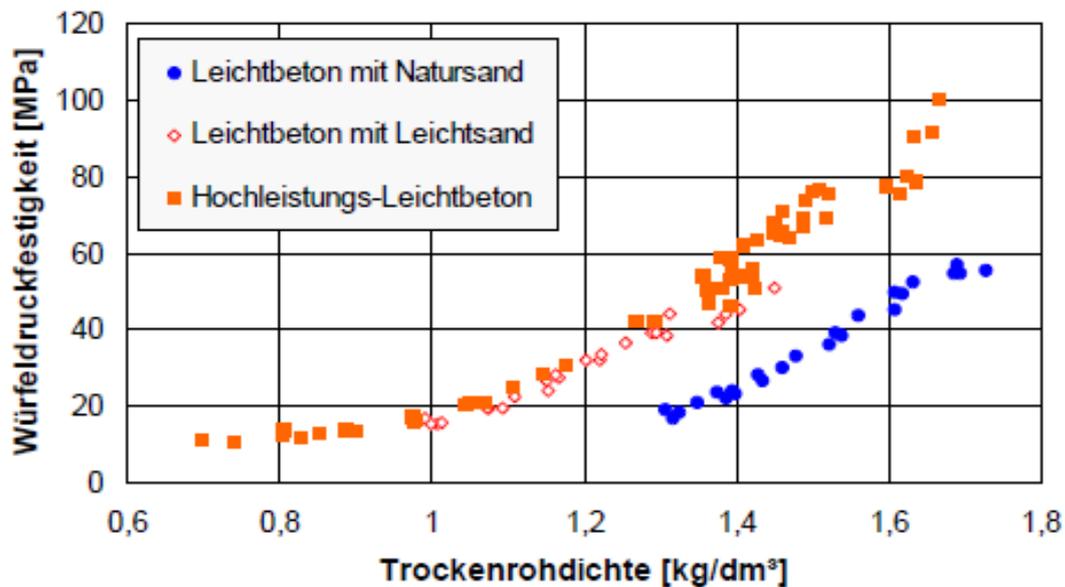


Abb. 19: Zusammenhang zwischen Würfeldruckfestigkeit und Beton-Trockenrohddichte am Beispiel von Leichtbeton mit Blähton [3]

Matrixporigkeit

Dem gefügedichten Leichtbetonen stehen solche mit porigem Gefüge gegenüber, die oft auch als wärmedämmende Leichtbetone bezeichnet werden. Zu ihnen zählen die matrixporigen Leichtbetone (siehe Abb.20), bei denen durch die Zugabe von Schaumbildnern oder Treibmitteln die Mörtelmatrix aufgeschäumt bzw. aufgebläht wird, aber auch die haufwerksporigen Leichtbetone, die durch Reduktion des Feinzuschlages und des

Zementleimgehaltenes hergestellt werden. Im zuletzt genannten Fall werden die Grobzuschläge nur mit dem Mörtel umhüllt und punktwise miteinander verklebt. Dadurch entstehen, bei ausreichend steifer Konsistenz des Zementleimes, nach dem verdichten Hohlräume, die als Haufwerksporen bezeichnet werden [5].

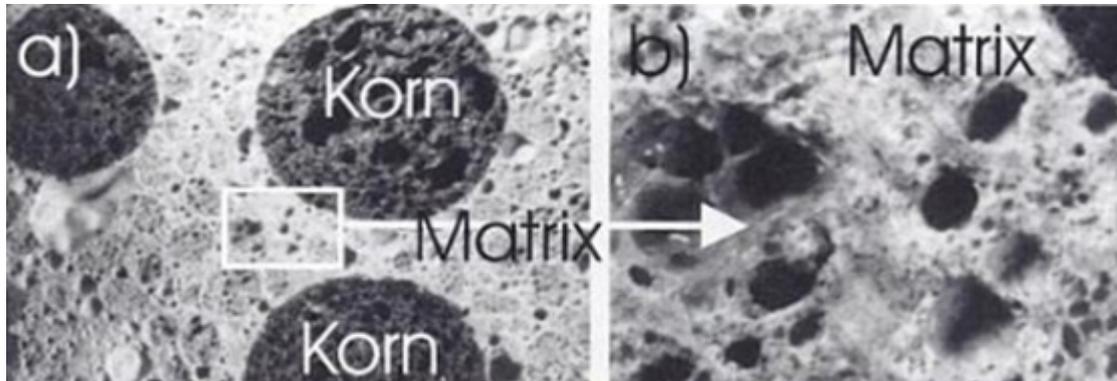


Abb.20: Leichtbeton mit matrixporigem Gefüge [5]

Haufwerksporigkeit

Die Herstellung des haufwerksporigen Leichtbetons (siehe Abb.21) erfolgt durch die Reduktion des Feinzuschlag- und Zementleimgehaltes. Dadurch werden die Grobzuschläge mit dem Mörtel nur umhüllt und punktwise miteinander verklebt, sodass nach dem verdichten bei ausreichend steifer Konsistenz des Zementleimes Hohlräume zwischen den Körnern verbleiben, die sogenannten Haufwerksporen. Für haufwerksporige Betone können sowohl Zuschläge mit dichtem Gefüge als auch Leichtzuschläge verwendet werden [5].

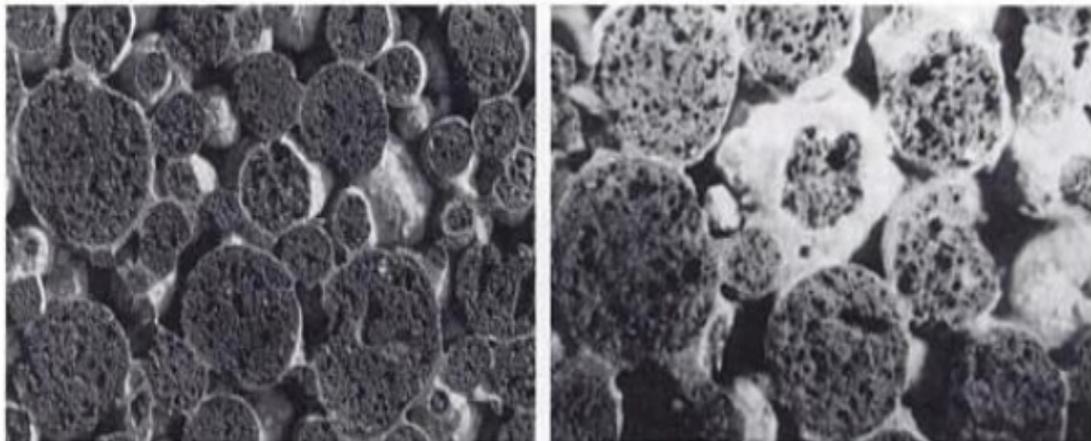


Abb.21: Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge [5]

2.3.3 Mischungsentwurf

Leichtbeton wird entweder über seine Eigenschaften oder seine Zusammensetzung festgelegt. Auf diese Weise werden dem Hersteller des Frischbetons die Anforderungen an den Frisch- und Festbeton vorgegeben. Dabei muss der Hersteller des Betons die Anwendung, die Nachbehandlungsbedingungen, die Bauwerksabmessungen und die Expositionsklassen des gewünschten Betons berücksichtigen.

2.3.4 Auswahl der Zuschläge

Das Festigkeitspotential des gewählten Leichtzuschlages ist mitunter für die erreichbare Druckfestigkeit eines Leichtbetons verantwortlich. Die Matrixdruckfestigkeit wirkt sich ab einem gewissen Spannungsniveau, der sogenannten Grenzfestigkeit, nicht mehr festigkeitssteigernd auf den Leichtbeton aus (siehe Abb. 22) [5].

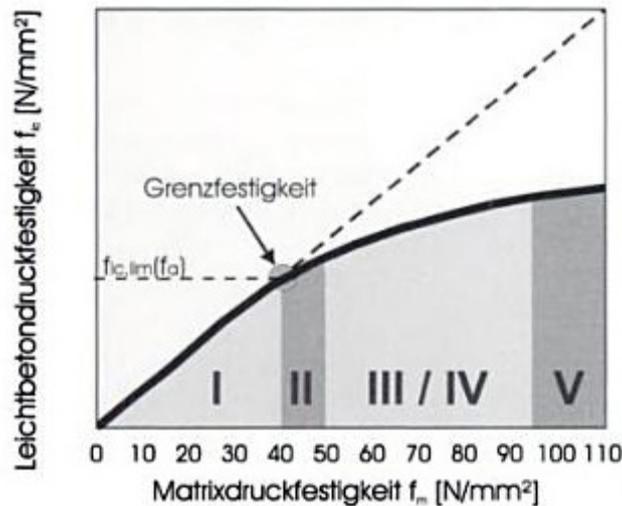


Abb. 22: Leichtbetonfestigkeit in Abhängigkeit von der Matrixdruckfestigkeit [16]

Um daher eine vorgegebene Betonfestigkeit zu erreichen, muss im ersten Schritt eine bestimmte Sandart mit einem geeigneten Grobzuschlag in Verbindung gebracht werden [5].

Neben der angestrebten Festigkeit sollen die Komponenten auch im Hinblick auf eine homogene Mischung ausgewählt werden. Um einer sogenannten Entmischung entgegen zu wirken, gibt es mehrere Möglichkeiten, diese werden im Kapitel 4 genauer beschrieben. Ein weiterer Effekt der bei der Mischung mit Leichtzuschlägen auftreten kann ist, dass die Zuschläge aufgrund ihrer geringen Rohdichte aufschwimmen und sich somit nur an der oberen Fläche des erhärteten Betons befinden. Wie man diesem Effekt entgegen wirkt wird im ebenfalls im Kapitel 4 genauer beschrieben.

2.3.5 Technologie

Die Klassifizierung von Leichtbetonen erfolgt über ihre Trockenrohichte und ihre Druckfestigkeit. Angesichts des großen Spektrums an Leicht- und Feinzuschlägen, können die Werte der Druckfestigkeit und der Trockenrohichte innerhalb einer großen Bandbreite variieren. Der Leichtzuschlag, welcher ganz entscheidend die Eigenschaften des gefügedichten Leichtbetons bestimmt, steht im Mittelpunkt der Leichtbetontechnologie. Für Normalbeton ist der Einfluss des dichten Zuschlages nicht relevant. Die mechanischen Kennwerte von Leichtzuschlägen, wie ihre Druck- und Zugfestigkeit sowie der E-Modul, können mit hinreichender Genauigkeit über die Kornrohichte beschrieben werden und aus Abb.23 bis Abb.25 entnommen werden [5].

Mischungsentwurf	
Zement 52,5 R	460 kg/m ³
Zugabewasser	110 kg/m ³
Grobzuschlag	400 dm ³ /m ³
Sand	260 dm ³ /m ³
Silikasuspension	16 % * z
Fließmittel	2 % * z

eff w/b = 0,3

Zuschlag wassergesättigt

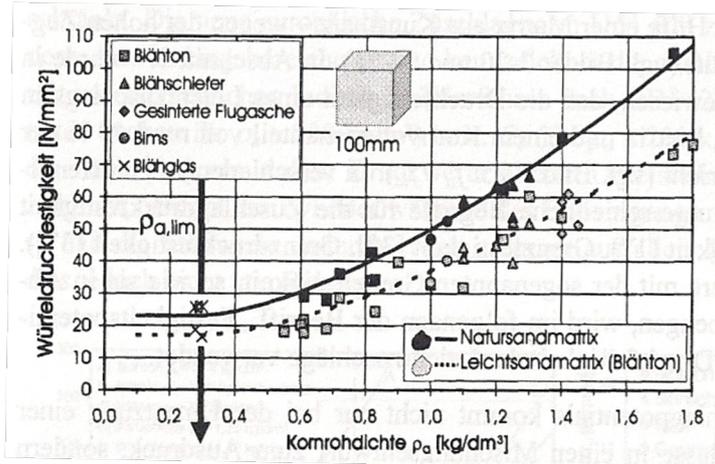


Abb.23: Würfeldruckfestigkeit des Leichtbetons [5]

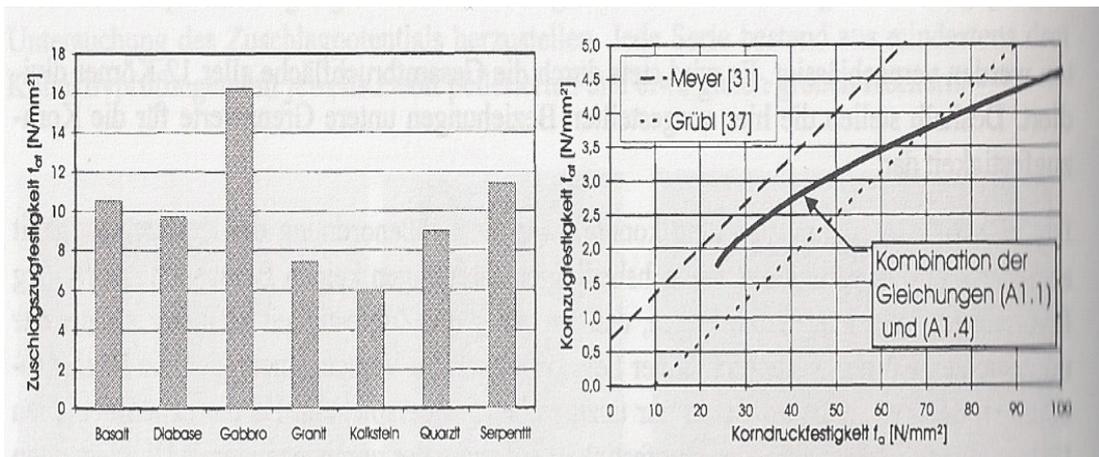


Abb.24: Kornzugfestigkeit der Leichtzuschläge [5]

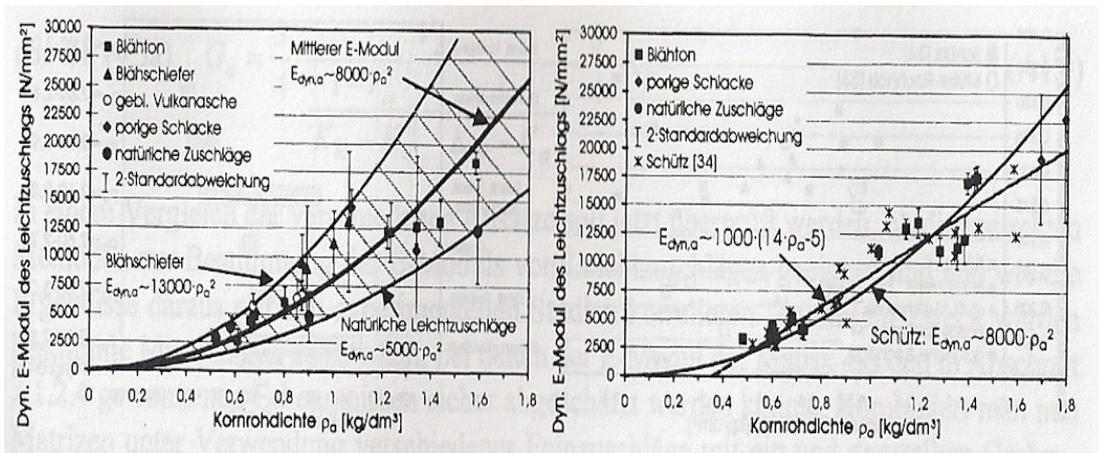


Abb.25: E-Modul und Kornrohichte verschiedener dichter Zuschläge [5]

Dadurch ist es möglich, eine Betonrezeptur zu konzipieren, welche unabhängig vom Leichtzuschlagstyp ist. Allerdings unterscheiden sich die Leichtzuschläge in ihrem Verhältnis

von offenen zu geschlossenen Poren. Ebenso unterscheiden Sie sich in ihrem Porensystem, d.h. in der Porengrößenverteilung. Das richtige Abschätzen des Sättigungsgrades und des Absorptionsverhaltens des eingesetzten Zuschlages beim Mischungsentwurf hinsichtlich des w/z-Wertes und der Verarbeitungsdauer stellt die Schwierigkeit bei der Leichtbetonherstellung dar.

Der Anteil der Leichtbetone mit Leichtzuschlägen in allen Kornfraktionen beläuft sich zurzeit auf unter 10%. Der restliche Anteil von 90% wird überwiegend mit Natursand hergestellt. Der Grund für die ungleiche Verteilung liegt im niedrigeren Preis und in der einfacheren Herstellung mit Natursand.

Normalbeton ist bei der Herstellung billiger als Leichtbeton. Dies liegt vor allem an einem höheren Preis für die Leichtzuschläge und dem höheren Zementgehalt [5]

2.3.6 Leichtzuschläge

Als leichte Gesteinskörnung (Leichtzuschläge) werden Zuschläge mineralischer Herkunft mit einer Kornrohddichte $\rho_a \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ oder ofentrockene Schüttdichte $\rho_b \leq 1200 \text{ kg/m}^3$ bezeichnet. Organische Materialien wie Holzspäne, Holzwolle, Kornhülsen, zerhacktes Stroh oder Polystyrolkugeln werden bei dieser Definition ausgeschlossen. In Abb.26 ist das Spektrum der Kornrohddichte (siehe Abb. 18) und der Schüttdichte von verschiedenen Zuschlägen ersichtlich.

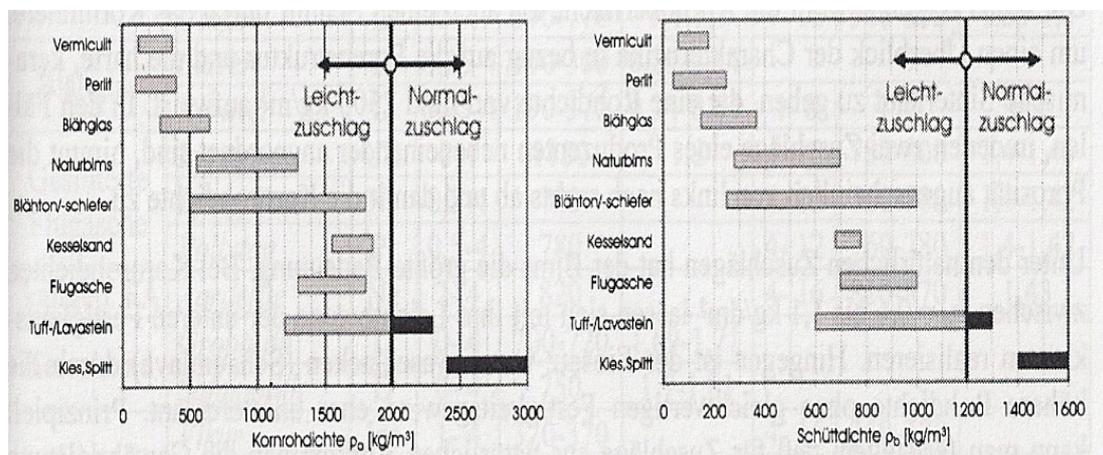


Abb.26: Spektrum der Kornrohddichte / Schüttdichten verschiedener Zuschläge [5]

Auf europäischer Ebene werden Leichtzuschläge in der EN 13055-1 behandelt. Für Leichtzuschläge ist die maßgebende Kenngröße die Kornrohddichte, da sie die mechanischen Eigenschaften des Zuschlagkorns bestimmt. Das Verhältnis der Kornmasse zu dem von der Kornoberfläche eingeschlossenen Volumen inklusive aller Poren ergibt die Kornrohddichte. Die Reindichte erhält man, wenn man die Kornmasse lediglich auf den von den festen Bestandteilen eingenommenen Raum bezieht. Die Bestimmung der Kornrohddichte erfolgt nach EN 1097-6.

Für die volumetrische Dosierung der Zuschläge wird die Masse eines Haufwerks aus Zuschlägen im Verhältnis zum eingenommenen Schüttvolumen herangezogen. Man spricht dann von der Schüttdichte ρ_b . Die Bestimmung der Schüttdichte erfolgt nach EN 1097-3.

Eine Gliederung nach der Herkunft und den Herstellungsprozessen von verfügbaren Leichtzuschlägen ist in Tabelle 4 dargestellt [5].

Tabelle 4: Gliederung der verfügbaren Leichtzuschläge [5]

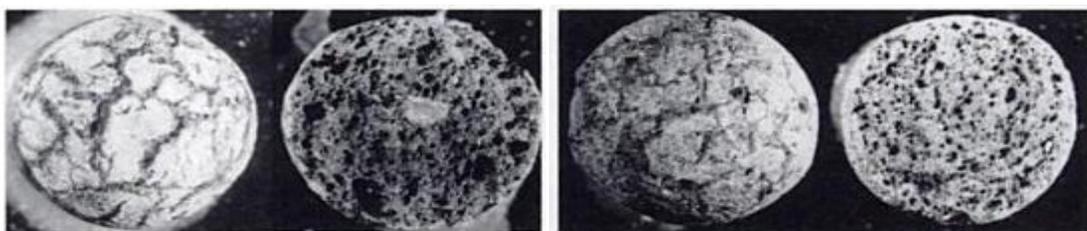
Zuschlagsgruppe	Ausgangsprodukt	Ursprung	Herstellung	Leichtzuschläge
natürlich	natürliche Materialien	vulkanisch	mechanischer Prozess	Naturbims, Lavastein, Tuffstein
industriell		mineralisch, vulkanisch	thermischer Prozess	Blähton, Blähschiefer, Perlite, Vermiculite
	Nebenprodukte aus industrieller Fertigung	mineralisch	thermischer Prozess	gesinterte Flugasche, Blähschlacke, Blähglas
			Verarbeitung ohne Brennen	kaltgebundene Flugasche
			ohne Weiterverarbeitung	Kesselsand, Schmelzkammergranulat, Hochofenschlacke (Hüttenbims)
rezykliert	Leichtbeton	Abbruchmaterial	mechanischer Prozess	Rezylierter Leichtzuschlag

Die Natürlichen Ausgangsprodukte finden sich in der ersten Hauptgruppe der Leichtzuschläge. Gewisse Zuschläge können alleine durch mechanische Prozesse wie brechen und sieben gewonnen werden, sofern diese bereits eine gewisse natürliche Porosität aufweisen. Zuschläge die nicht oder nur eine geringe natürliche Porosität aufweisen wie zum Beispiel Ton, Tonschiefer oder Schiefertone, können mittels thermischer Prozesse künstlich aufgebläht werden, damit deren Reindichte nicht mehr im Bereich von normalen Zuschlägen liegt. Neben den natürlichen Leichtzuschlägen gibt es auch noch industriell gewonnene und rezyklierte Zuschläge (siehe Tabelle 4). Bims hat die größte Bedeutung unter den natürlichen Zuschlägen. Bei industriell hergestellten Zuschlägen fällt es grundsätzlich leichter eine gleichbleibende Qualität und Beschaffenheit zu gewährleisten als bei natürlichen Zuschlägen. Eine Auswahl europäischer Leichtzuschläge ist in Tabelle 5 zusammengefasst, die die Bandbreite der lieferbaren Korndurchmesser sowie Schütt- und Kornrohdichten jeweils für Leichtsand und Grobzuschläge aufzeigt [5].

Tabelle 5: Europäische Leichtzuschläge (Auswahl) im Überblick [14]

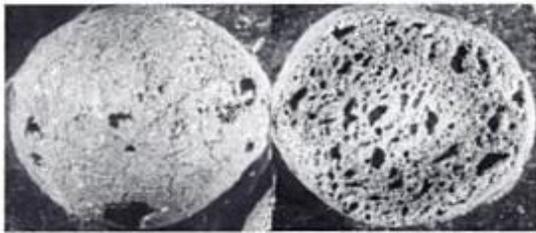
Leichtzuschlag	Produktname	Land	Leichtsand			Grobzuschlag		
			\varnothing_a mm	ρ_b kg/m ³	ρ_a kg/dm ³	\varnothing_a mm	ρ_b kg/m ³	ρ_a kg/dm ³
Blähton	Ares	I	0-3			3-20	400-800	0,58-1,3
	Argex	Bel	0,5-4		1,1	4-16	360-440	0,66-0,78
	Arliat	Esp	0-4	400-500		3-16	300-750	0,58-1,3
	Embra	Pl	0-4	490	0,79	4-16	270-360	0,51-0,68
	Fibo Exclay	D	0-4	375-750	0,85-1,3	4-8	375-425	0,75
	Leca Austria	a	0-4	340-650	0,78-1,45	4-12	320-650	0,55-1,1
	Liapor	D	0-4	600-720	1,3-1,7	4-16	325-987	0,61-1,68
	Norsk Leca	Nor	0-4	450-600	0,85-1,2	4-20	300-350	0,65-0,75
Bläh-schiefer	Berwilit	D	0-4	700-900	1,35-1,65	4-16	570-625	1,1-1,25
	Granulex	F	0,5-4	400-700	0,65-1,25	4-25	400-700	0,65-1,25
	Ulopor	D	0-4	570-770	1,4-1,7	4-16	540-550	1,25-1,3
Blähglas	Liaver	D	0,25-4	190-300	0,29-0,54			
	Poraver	D	0,25-4	190-370	0,34-0,64	4-8	170	0,3
Gesinterte Flugasche	Lyttag	UK	0-4	1150	1,8	4-12	780-800	1,4-1,45
	Lyttag Vasim	Ne	0,5-4	780		4-12	760-780	1,4-1,42
	Pollytag	Pl	0,5-4	780		4-12	760-780	1,4-1,42
kaltgeb. FA	Aardelite	Ne	2-4	820		4-16	810-870	1,43
Kesselsand	Grobolith	D	0-4	700-720	1,69-1,71			
	Safamololith	D	0-4	750	1,7-1,81			
Bims	Vikur	Ice	1-4	320-370		4-16	350-370	
	Yali-Bims	Gre	0-5	720		5-16	550-670	

Die Zuschlagkörner verschiedener Hersteller sind zur Veranschaulichung in Abb. 27 dargestellt. Die Fotos zeigen einen Schnitt durch das Korninnere (rechts) sowie die Kornoberfläche (links). Bei manchen Bildern sind zwei Leichtzuschläge desselben Produzenten nebeneinander dargestellt. In diesen Fällen nimmt die Porosität augenscheinlich von links nach rechts ab und damit die Kornrohichte zu [5].

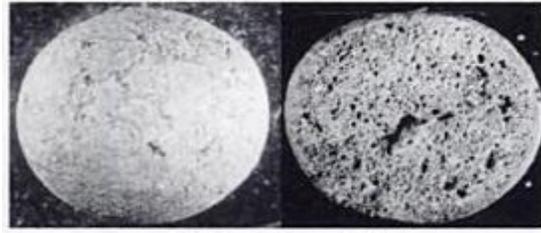


Blähton: *Liapor 4,25*

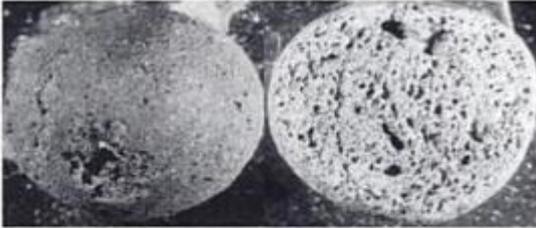
Blähton: *Liapor 6,5*



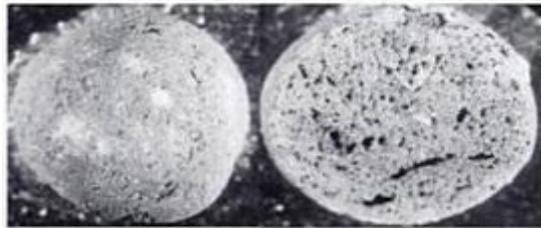
Blähton: *Leca NW*



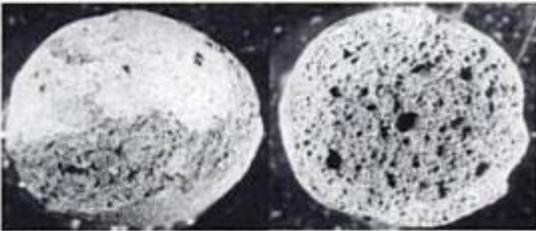
Blähton: *Leca HD*



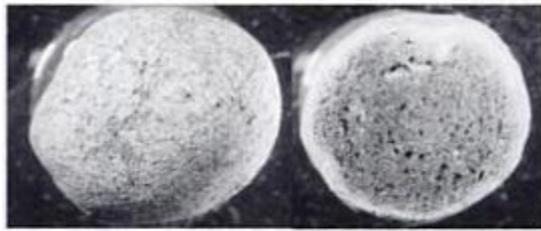
Blähton: *Argex R*



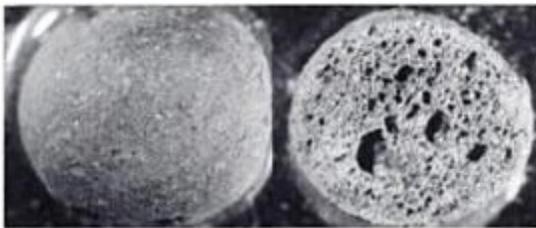
Blähton: *Argex 650*



Blähton: *Arlita F3*



Blähton: *Arlita F7*



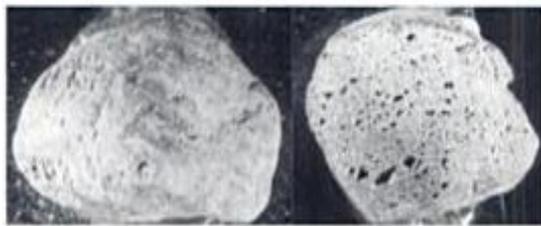
Blähton: *Fibo*



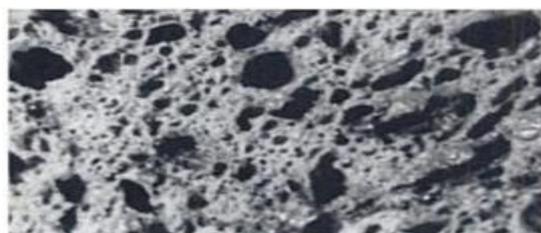
Blähton: *Embra*



Blähschiefer: *Berwilit N*



Blähschiefer: *Berwilit S*



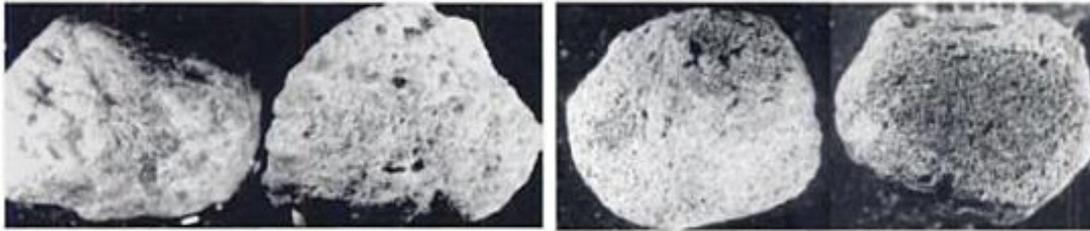
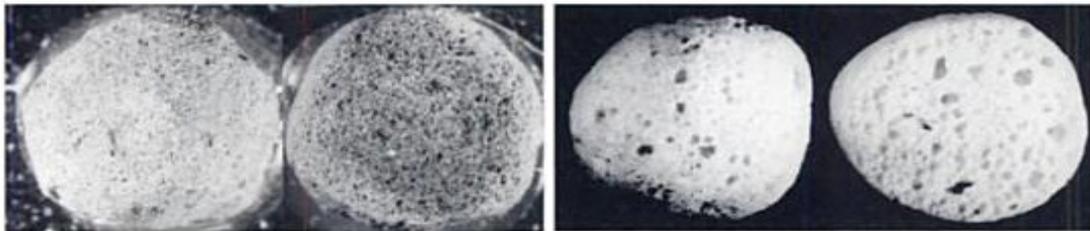
Bims: *Yali Bims*Gesinterte Flugasche: *Vasim*Gesinterte Flugasche: *Lytag UK*Blähglas: *Poraver*

Abb. 27: Typische Leichtzuschläge von außen (jeweils links) und im Schnitt (jeweils rechts) [5]

Die Herstellung von industriellen Leichtzuschlägen beruht auf Blähvorgängen. Durch das Verbrennen bestimmter Rohstoffbestandteile wird eine Gasentwicklung hervorgerufen oder es wird eine geschmolzene Rohstoffmasse mit Wasser vermischt, dessen Wasser beim Abkühlen eine zellenartige Struktur hinterlässt.

2.4 Selbstverdichtender Leichtbeton Sachstandsbericht

Eine der neuesten Entwicklungen auf dem Sektor der Hochleistungsbetone wird durch den selbstverdichtenden Leichtbeton dargestellt. Die Trockenrohddichte dieses selbstverdichtenden Betons liegt unter 2000 kg/m^3 . In ihm spiegeln sich die bekannten Vorzüge des Leichtbetons (geringes Gewicht bei doch hoher Festigkeit und günstigen bauphysikalischen Eigenschaften) und des selbstverdichtenden Betons (Beton welcher alleine durch die Schwerkraft verdichtet und keine weiteren Arbeitsschritte dafür benötigt) wieder. SVLB muss dieselben rheologischen Eigenschaften (Fließvermögen, hohen Entmischungswiderstand und problemloses Entlüften) erfüllen, die auch an einem SVB gestellt werden. Allerdings entstehen aus den Eigenschaften des verwendeten Leichtzuschlages einige besondere Merkmale von SVLB gegenüber SVB [6] [26].

- Die Gewichtskraft, welche die treibende Kraft des Fließ- und Verdichtungsprozesses ist, ist abhängig von der Rohddichte des Leichtzuschlages und somit bei SVLB geringer als bei SVB. Der Fließ- und Verdichtungsprozess ist somit bei SVLB geringer als bei SVB [26].

- Bei einer nicht ausreichenden Viskosität und einer zu geringen Fließgrenze des Mörtels neigt der Grobzuschlag, aufgrund der erheblichen Differenz zwischen der Kornrohichte der groben Leichtzuschläge und der Rohdichte des Mörtels, zum Aufschwimmen. Durch gezielte Vorversuche auf Leim und Mörtelbasis kann diesem Problem entgegen gesteuert werden [26].
- Die Saugfähigkeit der porösen Leichtzuschläge führt zu einem Entzug des Zugabewassers, wodurch es zu einem vorzeitigen Anssteifen des Frischbetons und somit zum Verlust der selbstverdichtenden Eigenschaften kommen kann. Diesem Prozess kann durch dichte Oberflächenschichten der Leichtzuschläge oder durch gezieltes Vornässen entgegen gewirkt werden [26].

Untersuchung an Mehlkornleim

Der Schlüssel zur Herstellung eines SVLB liegt in der Optimierung der Konsistenz des Bindemittel- bzw. Mehlkornleimes und des Frischmörtels (siehe Abb.28), ähnlich wie beim SVB. Um das Aufschwimmen der Leichtzuschläge zu verhindern, müssen der Mehlkornleim und der Frischmörtel eine ausreichende Viskosität besitzen. Ebenfalls müssen sie aber eine geringe Fließgrenze aufweisen. Durch die Erhöhung des Mehlkornanteils sowie die Verwendung von Stabilisierern kann die Viskosität angehoben werden, während die Fließgrenze durch die Zugabe von Fließmitteln reduziert wird. In Abb.28 sind die Entwicklungsstadien bis hin zu einem SVLB dargestellt.

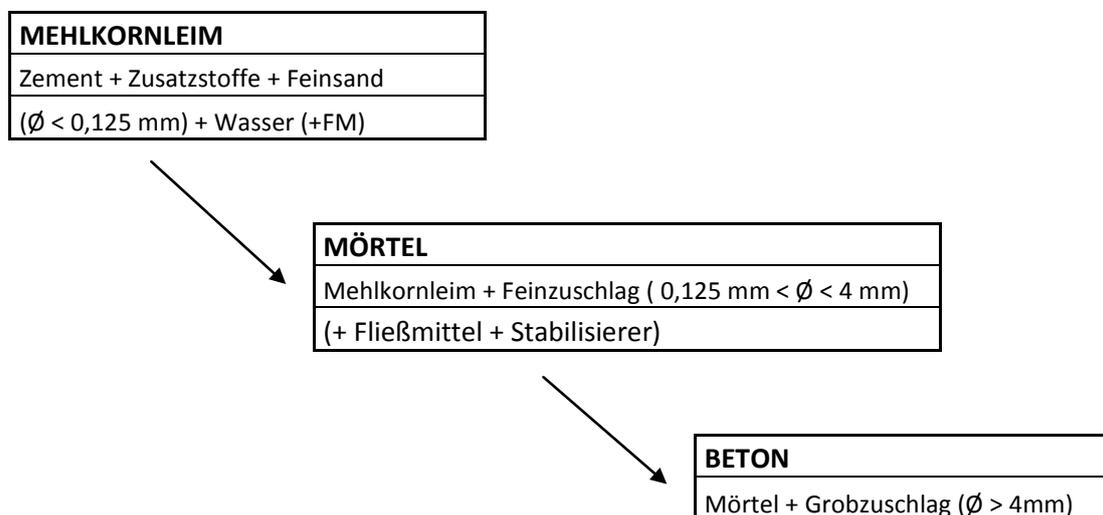


Abb.28: Konzept der Vorgehensweise bei der Entwicklung von einem selbstverdichtenden Leichtbetonen [26]

3 Vorversuche und Versuchsplanung

3.1 Allgemeines

Die Vorversuche dienen dazu, die technologischen Eigenschaften der später verwendeten Stoffe besser zu kennen, um auf diese schon vor den eigentlichen Versuchen eingehen zu können.

Liapor

Die zunächst durchgeführten Vorversuche beschäftigten sich mit dem Zuschlagstoff Liapor, welcher durch sein geringes Gewicht dafür verantwortlich ist, dass der Beton als Leichtbeton klassifiziert werden kann. Der Zuschlagstoff Liapor ist sehr porös und ist sowohl während des Mischens, wie auch im Zeitraum bis zum Erstarren des Leichtbetons sehr stark wassersaugend. Durch die Wasserentnahme aufgrund des Liapors, steht dem Zementstein zunächst nicht genügend Wasser zur Verfügung. Dies wirkt sich daher auf die Bildung von Kapillarporen aus. Die Porenstruktur des Zementsteins wird im Zuge der weiteren Hydratation immer feiner. Dadurch entsteht eine zunehmende Kapillarkapillarwirkung im Gefüge, sodass ein Teil des im Liapor gespeicherten Wassers wieder herausgesogen wird und somit eine innere Nachbehandlung des Leichtbetons hervorruft. Dadurch kann es passieren, dass die Gleichgewichtsfeuchte im Beton aufgrund des sehr dichten Gefüges erst nach Jahren erreicht wird. Es kann dazu führen, dass der Frostwiderstand durch das überschüssige Wasser vermindert wird und die Wärmeleitfähigkeit erhöht wird. Beide Eigenschaften sind aus bauphysikalischer Sicht unerwünscht. Diese Prozesse haben dazu geführt, dass man meist von einem ausgiebigen Vornässen absieht. Durch eine längere Mischungsdauer wird dem beschleunigten Aussteifen des Betons entgegen gewirkt. Daher wurden vor Beginn der eigentlichen Versuche die verschiedenen Granulatstärken des Zuschlagstoffes auf ihre Wasseraufnahmefähigkeit überprüft.

Zunächst wurde an dem Granulat mit der Stärke 4 bis 8 mm getestet, wie lange die Liapor-Kugeln benötigen, um die Wassersättigung zu erreichen und ob diese überhaupt wassersaugend sind. Die Versuche wurden wie in Tabelle 6 ersichtlich, nach einer, fünf und zehn Minuten durchgeführt.

Tabelle 6: Bestimmung der Saugfähigkeit von Liapor Granulat 4 bis 8

Volumen Liapor	Wasser	Versuchsdauer	Trockengewicht	Feuchtgewicht	Gewichtszunahme	
[dm ³]	[l]	[min]	[g]	[g]	[g]	[%]
1,0	1,0	1	362,50	463,50	101,00	27,86
1,0	1,0	5	349,50	465,50	116,00	33,19
1,0	1,0	10	363,00	485,50	122,50	33,75

In Tabelle 6 ist klar zu erkennen, dass die Saugfähigkeit des Granulates mit der Zeit abnimmt. So ist nach einer Minute die maximale Saugfähigkeit bereits zu fast 83% erreicht. Zwischen der Probe nach fünf Minuten und nach zehn Minuten gibt es nur noch eine Zunahme von unter 2%, was darauf schließen lässt, dass nach zehn Minuten die Wassersättigung nahezu erreicht ist.

Im nächsten Schritt wurde nun die Saugfähigkeit des Granulates mit den Stärken 1/4, 4/8, und 8/16 durchgeführt. Die jeweiligen Granulate sind in Abb. 29 dargestellt. Im vorigen Versuch (siehe Tabelle 6) erkennt man, dass es ratsam ist den Versuch erst nach fünfzehn Minuten abzubrechen. Deswegen wurden die weiteren Versuche nach fünf, zehn und fünfzehn Minuten durchgeführt (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Bestimmung der Saugfähigkeit von Liapor Granulat 1/4, 4/8 und 8/16

Liapor	Wasser	Versuchs - dauer	Trocken - gewicht	Feucht - gewicht	Gewichtszunahme	
	[l]				[g]	[g]
1/4	1,0	5	272,00	420,00	148,00	54,41
1/4	1,0	10	291,00	460,00	169,00	58,08
1/4	1,0	15	372,00	589,50	217,50	58,47
4/8	1,0	5	314,50	420,00	105,50	33,55
4/8	1,0	10	254,50	341,00	86,50	33,99
4/8	1,0	15	320,50	430,00	109,50	34,17
8/16	1,0	5	213,50	280,00	66,50	31,15
8/16	1,0	10	284,50	381,50	97,00	34,09
8/16	1,0	15	272,50	367,00	94,50	34,68



Abb. 29: Liapor Granulat von links nach rechts; 1/4, 4/8 und 8/16

Des Weiteren wurde die Volumszunahme des Granulates getestet. Bei den Versuchen wurde festgestellt, dass die Zunahme des Volumens bis zu 10% betragen kann. Dies führt allerdings zu keinen allzu großen Auswirkungen auf den späteren Beton, da das Granulat selbst nur als Platzhalter für Luft dient und keine tragende Wirkung in der endgültigen Konstruktion übernimmt.

3.2 Mischungsentwurf

Da es sich bei selbstverdichtendem Leichtbeton um einen neuartigen Baustoff handelt wurde beim Mischungsentwurf von selbstverdichtendem Beton nach *Okamura* ausgegangen. Hierfür wurde wie bereits in Kapitel 2.2.4 erwähnt, vorgegangen.

4 Versuche und Auswertungen

4.1 Leimversuche – Bestimmung des Wassergehalts

Es wurden 11 Versuchsreihen zu je vier Proben durchgeführt. Die Versuche wurden von Reihe zu Reihe angepasst um möglichst schnell das gewünschte Versuchsergebnis zu erhalten. Sämtliche Klassifizierungen der Leimversuche wurden mit dem Konus nach Hägermann durchgeführt.

In einem SVLB wird der Wasseranspruch durch 4 Stoffe maßgeblich bestimmt. Diese Stoffe sind, Zement, puzzolanische oder inerte Zusatzstoffe (Flugasche) und Füller (<0,125mm). Der Übergang eines Kornhaufwerks in eine Suspension ist in Abb. 30 mittels vier Abbildungen dargestellt [5].

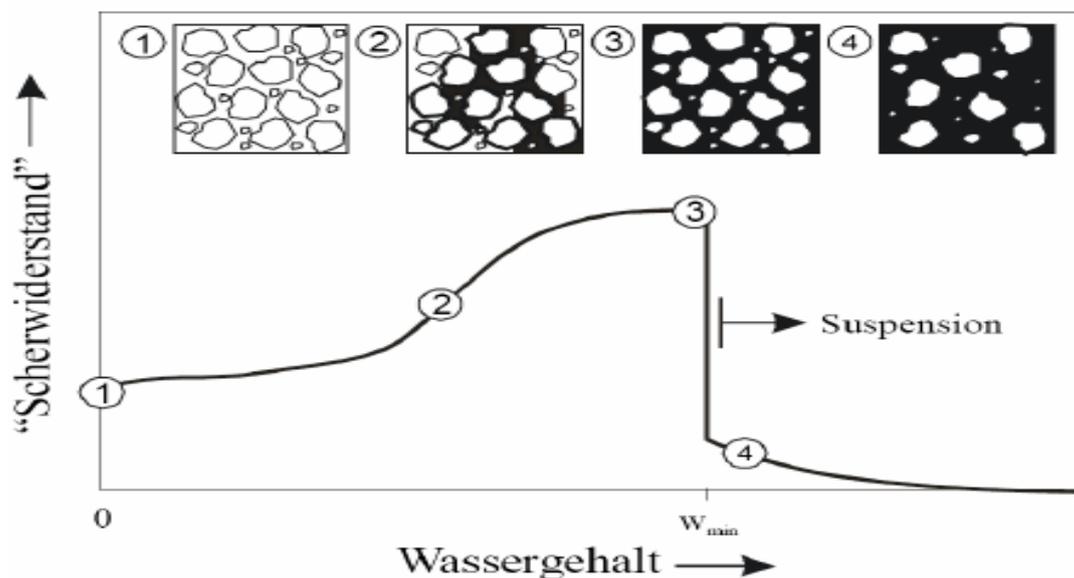


Abb. 30: Scherwiderstand eines Kornhaufwerks in Abhängigkeit vom Wassergehalt beim Übergang in eine Suspension [5]

4.1.1 Optimaler Wassergehalt Versuchsreihe 1 bis 4

Wie bereits erwähnt wurde, entsprechen bei dieser Arbeit die Mischungskriterien den Vorgaben von *Okamura*. Dieser sieht eine rein volumetrische Mischung der Stoffe vor. Es wurde immer das Volumen des Wassers, dem Volumen des Bindemittels gegenübergestellt. In Tabelle 8 ist der Mischungsentwurf der ersten Versuchsreihe angeführt.

Tabelle 8: Mischungsverhältnis der ersten Versuchsreihe

Zement	70 %	3,1	kg/m ³	
Kalkmehl	30 %	2,74	kg/m ³	
Gesamtvolumen	550	cm ³		
Volumen _{Wasser} /Volumen _{Bindemittel}	1,1	1,2	1,3	1,4
	[g]			
Wasser	288,1	300,0	310,9	320,8
Zement	568,3	542,5	518,9	497,3
Kalkmehl	215,3	205,5	196,6	188,4
	Setzfließmaß [mm]			
Richtung x	105	117	133	162
Richtung y	106	117	134	162
relatives Setzfließmaß	0,11	0,37	0,78	1,62

In der letzten Zeile der Tabelle 8 ist das relative Setzfließmaß angegeben. Nach *Okamura* dürfen nur solche Versuche zur Auswertung des optimalen W/B-Wertes herangezogen werden, die ein relatives Setzfließmaß zwischen 1 und 4 aufweisen. Hier ist klar zu erkennen, dass die ersten beiden Versuche der ersten Reihe eindeutig zu steif sind. Die vier Ergebnisse der ersten Versuchsreihe sind in Abb. 31 dargestellt.



Abb. 31: Ausbreitkuchen der ersten vier Versuche der ersten Versuchsreihe

Zweite Versuchsreihe

Nach der Auswertung der ersten Versuchsreihe und der Erkenntnis, dass diese zu steif war, wurde die Rezeptur für die zweite Versuchsreihe bestimmt. Da durch die fixe Vorgabe des Wasservolumens zum Bindemittelvolumen eine einfache Anhebung des Wassergehaltes, ohne eine Anpassung des Bindemittelvolumens nicht möglich war, wurde der prozentuelle Anteil des Zementes bzw. des Kalksteinmehles geändert, um die Suspension viskoser zu machen. Der neue Mischungsentwurf ist in Tabelle 9 ersichtlich.

Tabelle 9: Mischungsentwurf der zweiten Versuchsreihe

Zement	65 %	3,1	kg/m ³	
Kalkmehl	35 %	2,74	kg/m ³	
Gesamtvolumen	550	cm ³		
Volumen _{Wasser} /Volumen _{Bindemittel}	1,1	1,2	1,3	1,4
	[g]			
Wasser	288,1	300,0	310,9	375,6
Zement	527,7	503,8	481,8	540,6
Kalkmehl	251,2	239,8	229,3	0,0
	Setzfließmaß [mm]			
Richtung x	108	119	134	173
Richtung y	108	119	136	169
relatives Setzfließmaß	0,17	0,42	0,82	1,92

Durch die Änderung des Zement- zu Kalkmehlverhältnisses wurde die Suspension zwar etwas viskoser, allerdings liegen die Werte noch immer nicht zwischen den nach *Okamura* vorgesehenen Grenzen. Eine weitere Anpassung war also erforderlich.

Dritte Versuchsreihe

Nachdem die Suspension von der ersten zur zweiten Versuchsreihe flüssiger wurde, wurde abermals der Zementgehalt gesenkt und der Kalksteinmehlgehalt angehoben (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Mischungsentwurf der dritten Versuchsreihe

Zement	55 %	3,1	kg/m ³	
Kalksteinmehl	45 %	2,74	kg/m ³	
Gesamtvolumen	550	cm ³		
Volumen _{Wasser} /Volumen _{Bindemittel}	1,1	1,2	1,3	1,4
	[g]			
Wasser	288,1	300,0	310,9	320,8
Zement	446,5	426,3	407,7	390,7
Kalkmehl	322,9	308,3	294,8	282,6
	Setzfließmaß [mm]			
Richtung x	108	121	150	169
Richtung y	108	122	148	175
relatives Setzfließmaß	0,17	0,48	1,22	1,96

Durch die Änderung des Zement- zu Kalkmehlverhältnisses wurde die Suspension zwar etwas viskoser, allerdings liegen die Werte noch immer nicht zwischen den nach *Okamura* vorgesehenen Grenzen. Eine weitere Anpassung war also erforderlich.

Vierte Versuchsreihe

Die Zusammensetzung der vierten Versuchsreihe ist Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Mischungsentwurf der vierten Versuchsreihe

Zement	40 %	3,1	kg/m ³
Kalkmehl	60 %	2,74	kg/m ³
Gesamtvolumen	550	cm ³	
Volumen _{Wasser} /Volumen _{Bindemittel}	1,1	1,2	1,3
			1,4
			[g]
Wasser	288,1	300,0	310,9
Zement	324,8	310,0	296,5
Kalkmehl	430,6	411,0	393,1
			Setzfließmaß [mm]
Richtung x	110	129	148
Richtung y	107	129	150
relatives Setzfließmaß	0,18	0,66	1,22
			1,99

Nach einer weiteren Senkung des Zementgehaltes auf 40%, ist die Suspension zwar flüssiger, aber immer noch nicht im gewünschten Bereich nach *Okamura* (siehe Tabelle 11).

Da eine weitere Senkung des Zementgehaltes auf die spätere Festigkeit des Leimes einen zu starken Einfluss haben würde, ist eine erneute Anpassung nicht mehr zielführend. Durch die Möglichkeit das Kalksteinmehl durch andere Feinanteile auszutauschen, konnte eine Lösung dieses Problems gefunden werden. Die Abb. 32 bis Abb. 35 zeigt, dass das relative Setzfließmaß mit steigendem Wasser/Bindemittelwert von 1,1 bis 1,4 steigt (0,18 bis 1,22) der erforderliche Bereich des Setzfließmaßes (1 bis 4) jedoch nicht erreicht wird.

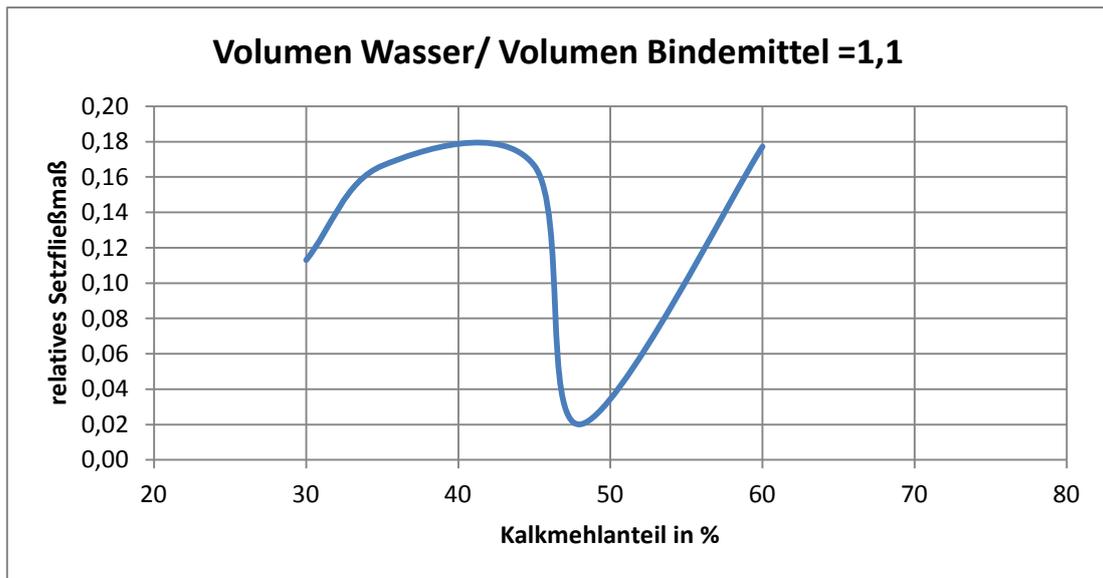


Abb. 32: Auswertung der ersten vier Versuchsreihen für das Volumenverhältnis von W/B = 1,1

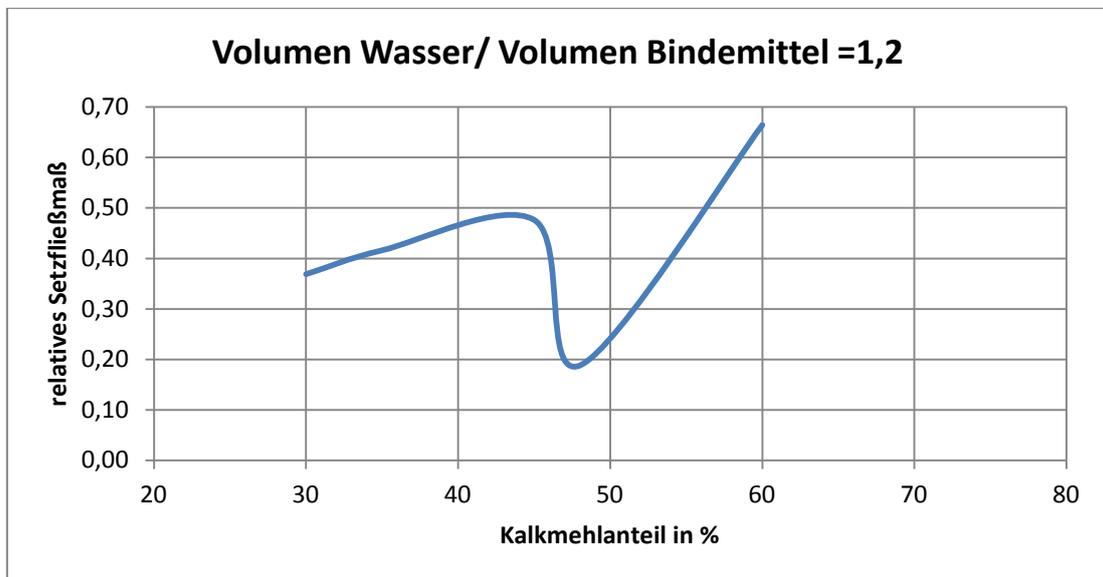


Abb. 33: Auswertung der ersten vier Versuchsreihen für das Volumenverhältnis von W/B = 1,2

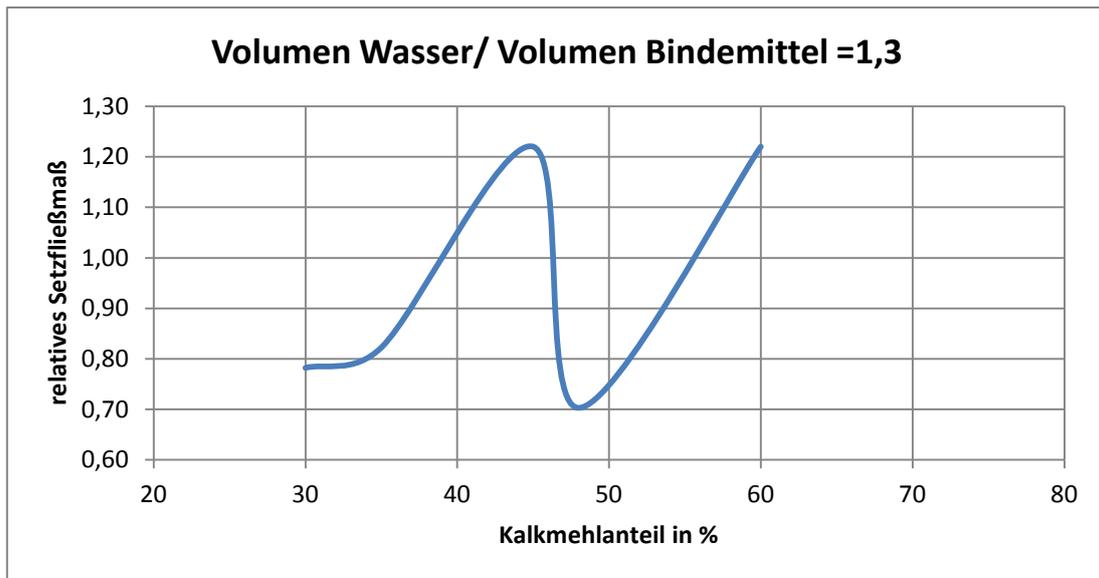


Abb. 34: Auswertung der ersten vier Versuchsreihen für das Volumenverhältnis von W/B = 1,3

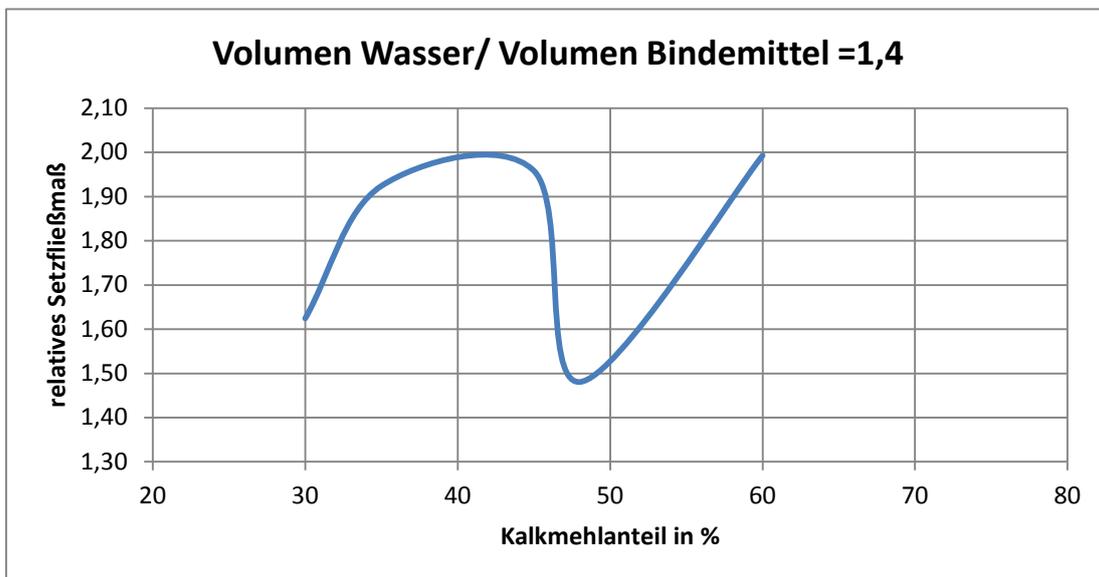


Abb. 35: Auswertung der ersten vier Versuchsreihen für das Volumenverhältnis von W/B = 1,4

Betrachtet man die Abb. 32 bis Abb. 35 ist zu erkennen, dass der Prozentuelle Kalkmehlanteil eine große Auswirkung auf das relative Setzfließmaß hat. Unabhängig vom Volumen W/B ist das relative Setzfließmaß immer bei knapp unter 50% Kalkmehlanteil am geringsten. Die genaue Ursache dafür wurde allerdings nicht weiter untersucht und ist daher nicht bekannt. Bei einer Steigerung oder Senkung des Kalkmehlanteils kommt es zu einer Vergrößerung des relativen Setzfließmaßes. Das größte Setzfließmaß wird zwischen 40 und 45% Kalkmehlanteil erreicht.

4.1.2 Rheologie

Es wurde zu Vergleichszwecken des Fließverhaltens (Rheologie) für Flugasche und Kalksteinmehl das Ausbreitmaß bei gleichem W/B-Wert bestimmt (Siehe Abb.36).



Abb.36: Ausbreitmaß Flugasche und Kalkmehl

In Abb.36 ist das Versuchsergebnis durch ein Bild dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Ausbreitmaß bei der Mischung mit Flugasche größer ist als das Ausbreitmaß bei der Mischung mit Kalksteinmehl. Dieses Ergebnis ist nochmal in Tabelle 12 nummerisch dargestellt. Aufgrund dieser Erfahrung wurden die kommenden Versuchsreihen ausschließlich mit Zement und Flugasche durchgeführt.

Tabelle 12: Ermittlung des Ausbreitmaßes für Flugasche und Kalksteinmehl

W/B-Wert = 0,45					
Flugasche	240,0 g	Kalkmehl	274,0 g		
Zement	465,0 g	Zement	465,0 g		
Wasser	317,3 g	Wasser	332,6 g		
Ausbreitmaß					
x-Richtung	Flugasche	y-Richtung	x-Richtung	Kalkmehl	y-Richtung
217 mm		213 mm	156 mm		157 mm
	$\beta_p = 3,62$			$\beta_p = 1,45$	

4.1.3 Optimaler Wassergehalt Versuchsreihe 5 bis 11

Bei dieser Versuchsreihe wurde das erste Mal mit Flugasche anstelle von Kalkmehl gearbeitet. In Tabelle 13 ist die Mischungszusammensetzung dargestellt.

Tabelle 13: Mischungsentwurf der fünften Versuchsreihe

Zement	60 %	3,1	kg/m ³
Flugasche	40 %	2,4	kg/m ⁴
Gesamtvolumen	550	cm ³	
Volumen _{Wasser} /Volumen _{Bindemittel}	1,1	1,2	1,3
	[g]		
Wasser	288,1	300,0	310,9
Zement	487,1	465,0	444,8
Flugasche	251,4	240,0	229,6
	Setzfließmaß [mm]		
Richtung x	158	197	230
Richtung y	160	196	232
relatives Setzfließmaß	1,53	2,86	4,34

Das fließfähigere Verhalten der Flugasche gegenüber dem Kalksteinmehl ist in Tabelle 13 durch gegenüberstellen mit Tabelle 9 bis Tabelle 11 zu erkennen. Die gewünschten Grenzwerte nach *Okamura* wurden allerdings wieder nicht eingehalten. Eine weitere Adaption der Zusammensetzung war daher erforderlich.

Sechste Versuchsreihe

Die Zusammensetzung der sechsten Versuchsreihe ist Tabelle 14 zu entnehmen.

Tabelle 14: Mischungsentwurf der sechsten Versuchsreihe

Zement	55 %	3,1	kg/m ³
Flugasche	45 %	2,4	kg/m ⁴
Gesamtvolumen	550	cm ³	
Volumen _{Wasser} /Volumen _{Bindemittel}	1,1	1,2	1,3
	[g]		
Wasser	288,1	300,0	310,9
Zement	446,5	426,3	407,7
Flugasche	282,9	270,0	258,3
	Setzfließmaß [mm]		
Richtung x	140	168	204
Richtung y	141	160	208
relatives Setzfließmaß	0,97	1,69	3,24

In der letzten Zeile der Tabelle 14 ist wieder das relative Setzfließmaß dargestellt. Aus der sechsten Versuchsreihe ist zu erkennen, dass sowohl die obere, als auch die untere Grenze nach *Okamura* nicht eingehalten werden kann.

Diese Tatsache führt zu der Überlegung, die Versuche nicht nach dem Verhältnis der Volumina zueinander, sondern nach dem Verhältnis von Zement+Flugasche zu Wasser, also mit dem W/B-Wert, durchzuführen. Es wird also vom Mischungsentwurf nach *Okamura* abgewichen um eine später brauchbare Lösung zu finden. Um zumindest die untere Grenze einzuhalten und diese etwas zu überschreiten, wurde in den kommenden Versuchen immer ein Mischungsverhältnis von Zement zu Flugasche mit 60 zu 40 gewählt.

Siebente Versuchsreihe

Die Zusammensetzung der siebenten Versuchsreihe ist Tabelle 15 zu entnehmen.

Tabelle 15: Mischungsentwurf der siebenten Versuchsreihe

Zement	60 %		3,1	kg/m ³
Flugasche	40 %		2,4	kg/m ⁴
Gesamtvolumen		550		cm ³
				[g]
Wasser	267,9	282,0	296,1	310,2
Zement	465,0	465,0	465,0	465,0
Flugasche	240,0	240,0	240,0	240,0
W/B-Wert	0,38	0,4	0,42	0,44
				Setzfließmaß [mm]
Richtung x	131	136	169	203
Richtung y	132	138	169	203
relatives Setzfließmaß	0,73	0,88	1,86	3,12

Auch hier ist wie bei den Versuchsabläufen nach *Okamura* zu erkennen, dass die ersten beiden Versuche der siebenten Versuchsreihe eine zu steife Konsistenz haben. Daher wurde der W/B-Wert erhöht und die Versuche erneut durchgeführt.

Achte Versuchsreihe

Die Zusammensetzung der achten Versuchsreihe ist Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Mischungsentwurf der achten Versuchsreihe

Zement	60 %		3,1	kg/m ³
Flugasche	40 %		2,4	kg/m ⁴
Gesamtvolumen			550	cm ³
			[g]	
Wasser	289,1	303,2	317,3	0,0
Zement	465,0	465,0	465,0	465,0
Flugasche	240,0	240,0	240,0	240,0
W/B-Wert	0,41	0,43	0,45	
Setzfließmaß [mm]				
Richtung x	168	172	229	
Richtung y	167	173	229	
relatives Setzfließmaß	1,81	1,98	4,24	

In der vierten Spalte der letzten Zeile der Tabelle 16 sieht man, dass bereits die dritte Mischung der achten Versuchsreihe, mit einem W/B-Wert von 0,45, den oberen Grenzwert überschreitet und daher der vierte Versuch dieser Reihe nicht mehr notwendig ist. Vergleicht man die letzten beiden Tabellen, Tabelle 16 und Tabelle 15, so stellt man fest, dass die Masse an Flugasche und Zement bei beiden Versuchsreihen immer gleich ist und lediglich der Wassergehalt variiert. Diese Wahl der Variation führt später zu einer besseren Erkenntnis über die Auswirkungen der einzelnen Bestandteile der Mischungen.

Neunte Versuchsreihe

Die Zusammensetzung der neunten Versuchsreihe ist Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 17: Mischungsentwurf der neunten Versuchsreihe

Zement	60 %	3,1	kg/m ³
Flugasche	40 %	2,4	kg/m ⁴
Gesamtvolumen		550	cm ³
		[g]	
Wasser	289,1	296,1	303,2
Zement	465,0	465,0	465,0
Flugasche	240,0	240,0	240,0
W/B-Wert	0,41	0,42	0,43
Setzfließmaß [mm]			
Richtung x	171	196	199
Richtung y	170	193	199
relatives Setzfließmaß	1,91	2,78	2,96

In der letzten Zeile der Tabelle 17 sieht man, dass sowohl der obere als auch der untere Grenzwert nach *Okamura* eingehalten wird. Somit lässt sich anhand der neunten Versuchsreihe der ideale Wassergehalt des Leimes bestimmen. Die ermittelten Werte (W/B-Wert und relative Ausbreitfläche) werden in ein x/y- Diagramm eingetragen. Der W/B-Wert wurde auf der Ordinate und die relative Ausbreitfläche wurde auf der Abszisse eingetragen. Daraus ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen W/B-Wert und Ausbreitfläche. Durch die Streuung, die bei Versuchen mit einem so komplexen Baustoff wie Beton auftreten, wurden die Datenreihen der jeweiligen Versuchsreihen mit Hilfe von EXCEL linearisiert. Durch Extrapolation der Ausgleichsgeraden (grün in Abb. 37) bis zur Ordinate, lässt sich im Schnittpunkt der beiden Geraden der optimale Wasseranspruch des Bindemittels ablesen (optimaler W/B-Wert). Die abgebildete Versuchsreihe hat einen optimalen W/B-Wert von 0,37 (siehe Abb. 37, senkrechter grüner Pfeil).

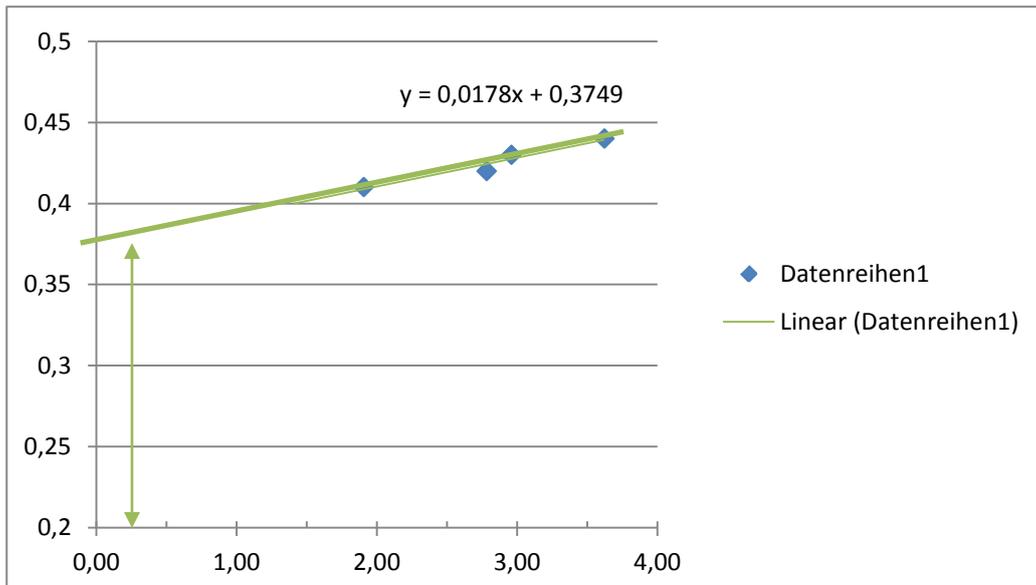


Abb. 37: Ermittlung des Wasseranspruches für die neunte Versuchsreihe

Obwohl die Ergebnisse der neunten Versuchsreihe innerhalb der gewünschten Grenzen liegen, wurden noch zwei weitere Versuchsreihen durchgeführt, um die Ergebnisse zu bestätigen.

Zehnte Versuchsreihe

Die Zusammensetzung der zehnten Versuchsreihe ist Tabelle 18 zu entnehmen.

Tabelle 18: Mischungsentwurf der zehnten Versuchsreihe

Zement	60 %	3,1	kg/m ³
Flugasche	40 %	2,4	kg/m ⁴
Gesamtvolumen		550	cm ³
		[g]	
Wasser	289,1	296,1	303,2
Zement	465,0	465,0	465,0
Flugasche	240,0	240,0	240,0
W/B-Wert	0,41	0,42	0,43
Setzfließmaß [mm]			
Richtung x	174	194	202
Richtung y	175	193	201
relatives Setzfließmaß	2,05	2,74	3,06

Beim Vergleich der jeweils letzten Zeile in Tabelle 17 und Tabelle 18 erkennt man, dass das relative Setzfließmaß keine starken Abweichungen zwischen den zwei Versuchen aufweist. Um diese Tatsache begründen zu können, wurde noch einmal mit denselben W/B-Werten eine dritte Versuchsreihe durchgeführt.

Elfte Versuchsreihe

Die Zusammensetzung der elften Versuchsreihe ist Tabelle 19 zu entnehmen.

Tabelle 19: Mischungsentwurf der elften Versuchsreihe

Zement	60 %	3,1	kg/m ³
Flugasche	40 %	2,4	kg/m ⁴
Gesamtvolumen		550	cm ³
		[g]	
Wasser	289,1	296,1	303,2
Zement	465,0	465,0	465,0
Flugasche	240,0	240,0	240,0
W/B-Wert	0,41	0,42	0,43
Setzfließmaß [mm]			
Richtung x	176	196	201
Richtung y	174	192	201
relatives Setzfließmaß	2,06	2,76	3,04

Die Ergebnisse der Versuchsreihen 9 bis 11 wurden in Tabelle 20 zusammengefasst und es wurde ein Mittelwert aus ihnen gebildet.

Zusammenfassung der Versuchsreihen sieben bis elf

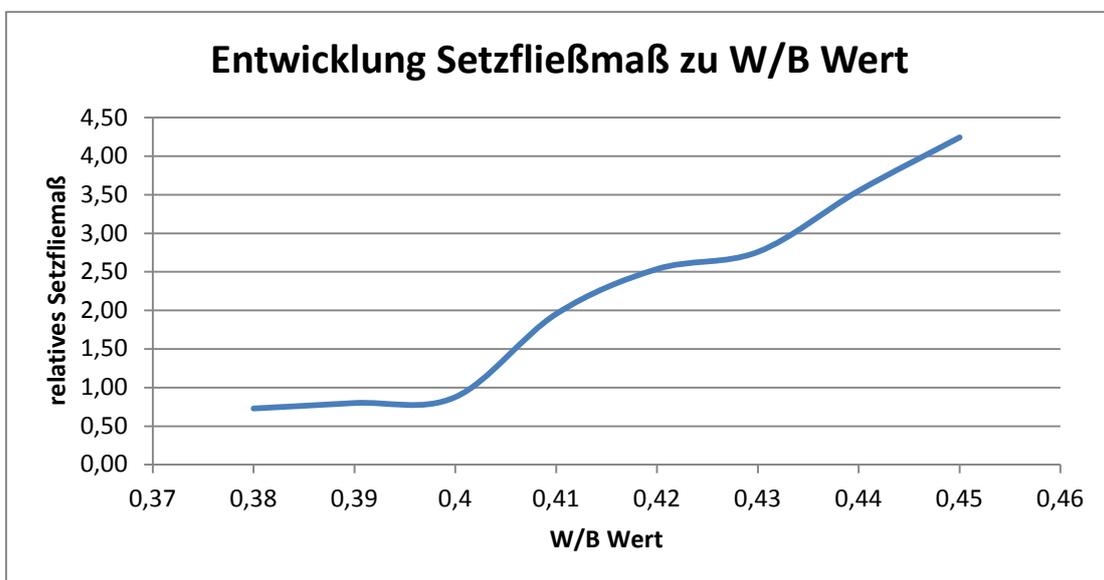


Abb. 38: Entwicklung des Setzfließmaßes in Abhängigkeit des W/B-Wertes

In Abb. 38 ist die Entwicklung des relativen Setzfließmaßes in Abhängigkeit des W/B-Wertes gegeben. In ihr ist zu erkennen, dass die Steigerung der Fließfähigkeit der Leimmischung erst ab einem W/B-Wert von 0,40 gewährleistet wird. Besonders interessant ist der Bereich des relativen Setzfließmaßes von 2,50 bzw. der Bereich des W/B-Wertes zwischen 0,42 und

0,43. In diesem Bereich kommt es zu keiner Steigung der Kurve, was darauf hinweist, dass die Vergrößerung des Wasservolumens in diesem Bereich keine Auswirkungen auf die Fließfähigkeit der Suspension hat.

Tabelle 20: Zusammenfassung der neunten bis elften Versuchsreihe

relatives Setzfließmaß				
W/B-Werte	0,41	0,42	0,43	0,44
Versuchsreihe 9	1,91	2,78	2,96	3,62
Versuchsreihe 10	2,05	2,74	3,06	3,69
Versuchsreihe 11	2,06	2,76	3,04	3,77
Mittelwert	2,00	2,76	3,02	3,69

In Abb. 39 ist das Ergebnis aus Tabelle 20 noch einmal grafisch dargestellt. In ihr ist zu sehen dass zwischen den Versuchsreihen 9,10 und 11 die Abweichungen zueinander sehr gering sind. Auf der Ordinate wurde das relative Setzfließmaß eingetragen, auf der Abszisse wurde der W/B-Wert eingetragen. Das Plateau in der Mitte der Kurve lässt darauf schließen, dass eine Änderung des Wassergehaltes in diesem Bereich eine nicht so große Auswirkung auf das relative Setzfließmaß hat wie in den anderen Bereichen.

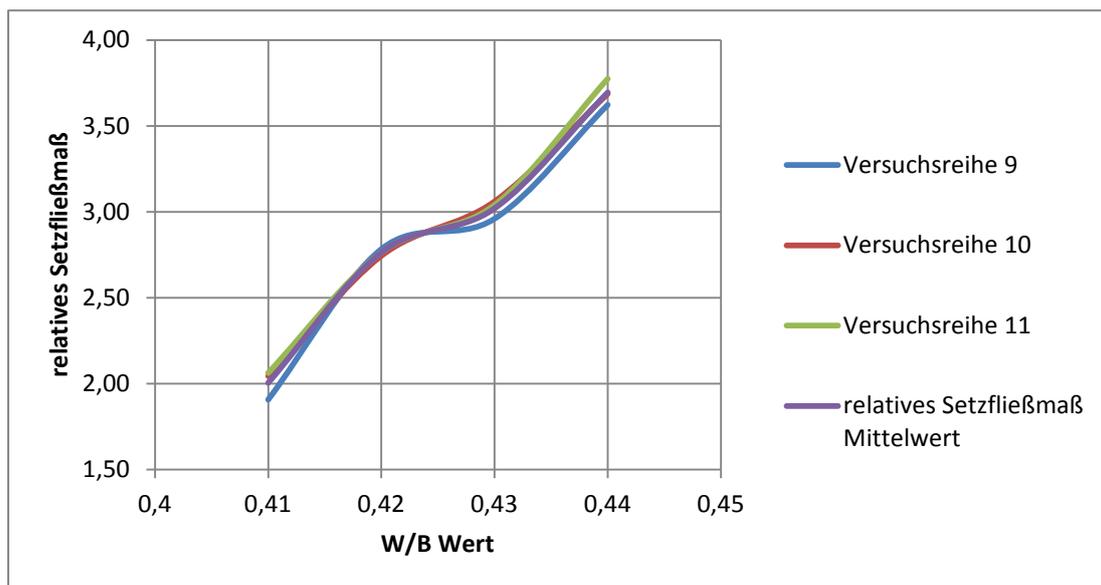


Abb. 39: Grafische Darstellung des Ausbreitmaßes für Versuchsreihe 9 bis 11

In Abb. 40 ist nur der Mittelwert des relativen Setzfließmaßes dargestellt. Aus dieser Graphik und aus den Versuchsreihen 9 bis 11 wurde später der Zementleim entwickelt.

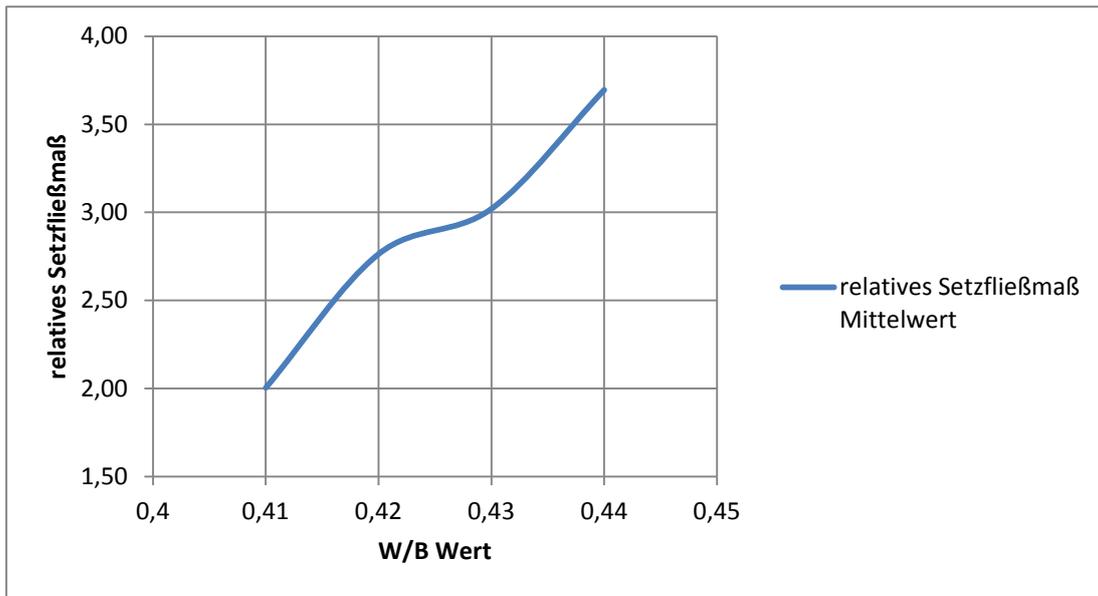


Abb. 40: Mittelwert des relativen Setzfließmaßes aus den Versuchsreihen 9 bis 11

In Abb. 41 ist das relative Setzfließmaß in Abhängigkeit vom Wassergehalte dargestellt. Vergleicht man die beiden Abbildungen (Abb. 40 und Abb. 41) erkennt man den gleichen Verlauf der Kurve.

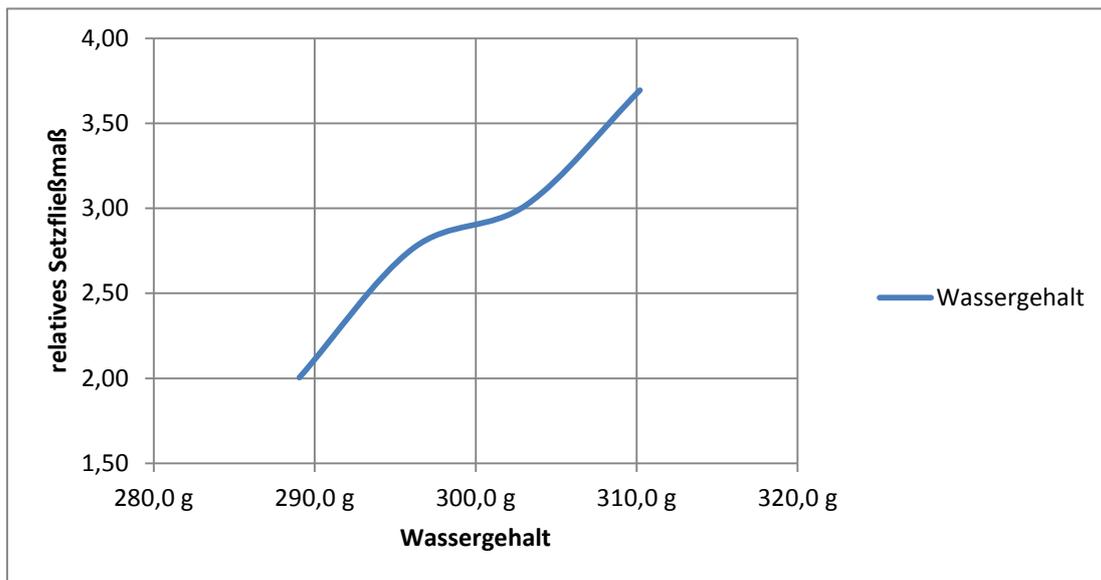


Abb. 41: relatives Setzfließmaß in Abhängigkeit von dem Wassergehalt

Der optimale W/B-Wert wurde für alle 3 Versuchsreihen (9 bis 11) bestimmt und ist in Tabelle 21 ersichtlich.

Tabelle 21: Optimaler W/B-Wert

	optimaler W/B-Wert	W/B-Wert nach <i>Okamura</i>
Versuchsreihe 9	0,3749	1,057
Versuchsreihe 10	0,3710	1,046
Versuchsreihe 11	0,3726	1,051
	optimaler Anteil Wasser	Anteil Wasser am Volumen
Versuchsreihe 9	264,3 g	51,39 %
Versuchsreihe 10	261,5 g	51,13 %
Versuchsreihe 11	262,7 g	51,24 %

Des Weiteren befindet sich in der letzten Spalte der Tabelle 21 der W/B-Wert nach *Okamura*, welcher sich auf eine Volumsbezogene Zusammensetzung des Zementleimes bezieht.

Aus den Versuchsreihen 9 bis 11 wurde, wie in Tabelle 22 dargestellt, die ideale Mischung, mittels einer Mittelwertbildung bestimmt.

Tabelle 22: Ideale Mischung aus Versuchsreihe 9 bis 11

	W/B-Wert	Wasser	Zement	Flugasche
Versuchsreihe 9	0,3749	264,33	465,00	240,00
Versuchsreihe 10	0,3710	261,54	465,00	240,00
Versuchsreihe 11	0,3726	262,70	465,00	240,00
Mittelwert	0,3729	262,86	465,00	240,00

In Tabelle 22 variiert nur der Wassergehalt der einzelnen Versuchsreihen. Die Begründung dafür wurde bereits in Kapitel 0 erwähnt. Ein weiterer Vorteil bei dieser Überlegung war, dass bei der Änderung von nur einem Stoff der Mischung, die Auswirkungen exakt zu erkennen sind. Die Mischungen sind somit leichter zu kalkulieren und es kann schneller auf ein wünschenswertes Ergebnis hingearbeitet werden.



Abb. 42: Ausbreitmaß der idealen Leimmischung

In Abb. 42 ist das ideale Ausbreitmaß, welches auf Basis der Versuchsreihen 9 bis 11 ermittelt wurde, abgebildet. Das relative Setzfließmaß der idealen Leimmischung ist in Tabelle 23 angegeben.

Tabelle 23: Setzfließmaß der idealen Leimmischung

ideale Leimmischung	
Richtung x	137
Richtung y	137
relatives Setzfließmaß	0,88

4.2 Mörtelversuche

Die Mörtelversuche dienen als Basis für die Betonversuche. Sie werden aufbauend auf die Leimversuche durchgeführt. Zu der Suspension, welche in den Leimversuchen erzeugt wurde, werden nun die feinen Gesteinskörnungen, in dem zu Beginn bereits festgelegten Anteil am Gesamtstoffraum, zugegeben (siehe Abb.5). Der Gehalt an feiner Gesteinskörnung (< 4mm) wird mit 40% im Mörtelvolumen angenommen. Die Versuche wurden ebenso wie die Leimversuche, aufeinander aufbauend durchgeführt, um möglichst rasch und unkompliziert zu einem gewünschten Ergebnis zu gelangen. Es wurden das Ausbreitfließmaß (siehe 2.2.8.1) und die Trichterauslaufzeit (siehe 2.2.8.2) der Mörtelsuspension gemessen. Ziel ist es, beim Ausbreitfließversuch ein Ausbreitmaß von 24,5 cm und beim Trichterauslaufversuch eine Auslaufzeit von 10 Sekunden zu erhalten. Der Mischungsentwurf basiert auf dem fertigen Zementleim und wird lediglich, wie bereits erwähnt, durch die feine Gesteinskörnung erweitert, aber auch mittels Fließ- und Stabilisierungsmitteln in die gewünschte Konsistenz gebracht.

4.2.1 Erster Mörtelversuch ohne Fließmitteleinsatz

In Tabelle 24 ist die Mischung des ersten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 24: Mischungsentwurf des ersten Mörtelversuches

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,62%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,75%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,64%
Gesteinskörnung 0/1	500,00	2,65	188,68	22,17%
Gesteinskörnung 1/4	402,00	2,65	151,70	17,82%
Fließmittel	0,00	1,10	0,00	0,00%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
			Summe 851,23	100,00%

Tabelle 25: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des ersten Mörtelversuches

Anteil Leim	60,01%
Anteil feine Gesteinskörnung	39,99%
Summe	100,00%

Vergleicht man die Werte der Tabelle 22 mit den Werten der Tabelle 24 sieht man, dass die Stoffmassen des Leimversuches in die Mörtelversuche übernommen worden sind. Des Weiteren ist in Tabelle 24 der Anteil der feinen Gesteinskörnung 0/1 und 1/4 in kg/m^3 gegeben. In Tabelle 25 ist die prozentuelle Aufteilung der verschiedenen Anteile angeführt. Der Anteil der feinen Gesteinskörnung ist mit 40% genau nach den Angaben nach *Okamura* gewählt (siehe Abb.5).

Nach Durchführung des ersten Mörtelversuches, welcher lediglich die Leimmischung und die feine Gesteinskörnung als Basis hatte, war sofort zu erkennen dass die Mischung viel zu steif ist (siehe Abb. 43). Daher wurde auch keine Messung des Durchmessers und damit auch keine Bestimmung des Ausbreitfließmaßes vorgenommen.



Abb. 43: Ausbreitkuchen des ersten Mörtelversuches

Aufgrund dieser Erkenntnis wurde bei weiteren Versuchen stets mit Fließmittel gearbeitet.

Fließmittel dienen dazu, den Beton flüssiger zu machen. Das in dieser Arbeit verwendete Fließmittel ist Dynamon SX 14. Dieses Fließmittel basiert auf der Basis von Naphtalensulfonat- (EN) oder Melaminsulfonatbasis (SM), ein chlorid- und formaldehydfreies Produkt auf der Basis von Acrylpolymeren. Die Vorteile eines Fließmittel sind, dass es zu einer Wasser- und Zementreduzierung der Mischung beiträgt. Ebenso führt die Zugabe von Fließmitteln zu einer erhöhten Festigkeit und zu einer verbesserten Verarbeitbarkeit. Ein weiterer Vorteil dieses Fließmittels ist, dass es im Gegensatz zu vielen anderen Fließmitteln, verträglich mit Flugasche ist [24].

4.2.2 Mörtelversuch mit Fließmittel aber ohne Granulat Versuchsreihe 2 bis 7

In Tabelle 26 ist die Mischung des zweiten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 26: Mischungsentwurf des zweiten Mörtelversuches

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,53%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,69%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,49%
Gesteinskörnung 0/1	500,00	2,65	188,68	22,06%
Gesteinskörnung 1/4	402,00	2,65	151,70	17,73%
Fließmittel	4,65	1,10	4,23	0,49%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
			Summe 855,45	100,00%

Wie in Tabelle 26 zu erkennen ist, wurde die Mischung aus dem ersten Mörtelversuch lediglich mit dem Fließmittel erweitert. Der Anteil des Fließmittels an der Mischung beträgt hier 1% des Zementanteiles.

Tabelle 27: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des zweiten Mörtelversuches

Anteil Leim	59,72%
Anteil feine Gesteinskörnung	39,79%
Summe (mit Fließmittel und Stabilisator)	100,00%

In Tabelle 27 ist wieder die prozentuelle Aufteilung der verschiedenen Anteile zu erkennen. Wie schon beim ersten Mörtelversuch wurde darauf geachtet dass, der prozentuelle Anteil der feinen Gesteinskörnung auf 40% bleibt.

Tabelle 28: Ergebnis des zweiten Mörtelversuches

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
316	314
$\beta_p = 8,92$	

In Tabelle 28 ist das Ausbreitfließmaßes des zweiten Mörtelversuches dargestellt. Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt, sollte sich ein Wert von $\beta_p = 5$ ergeben. Was einer Ausbreitung in die x- und y Richtung von 245 mm entspricht. Das bedeutet dass der Anteil des Fließmittels mit 1% des Zementanteiles zu hoch dosiert wurde. In Abb. 44 ist der zu flüssige Mörtel abgebildet.

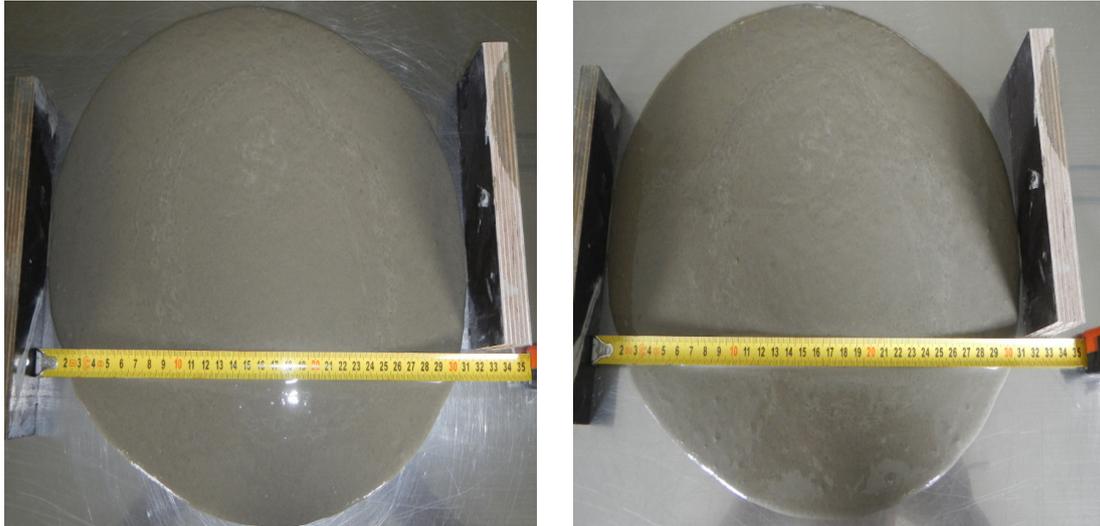


Abb. 44: Ausbreitkuchen des zweiten Mörtelversuches

Dritter Mörtelversuch

In Tabelle 29 ist die Mischung des dritten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 29: Mischungsentwurf des dritten Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,58%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,72%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,57%
Gesteinskörnung 0/1	500,00	2,65	188,68	22,11%
Gesteinskörnung 1/4	402,00	2,65	151,70	17,78%
Fließmittel	2,33	1,10	2,11	0,25%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
			Summe 853,34	100,00%

Aufgrund der Erkenntnisse aus dem zweiten Mörtelversuch wurde das Fließmittel halbiert und beträgt somit nur noch 0,5% des Zementanteiles.

Tabelle 30: Ergebnis des dritten Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
210	210
$\beta_p = 3,41$	

In Tabelle 30 ist ersichtlich, dass der β_p -Wert mit 3,41 zu niedrig ist, was daran liegt das die Fließmittelkonzentration mit 0,5% des Zementanteiles zu niedrig gewählt wurde. Der Mörtel ist also zu steif (siehe Abb. 45).



Abb. 45: Ausbreitkuchen des dritten Mörtelversuchs

Vierter Mörtelversuch

In Tabelle 31 ist die Mischung des vierten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 31: Mischungsentwurf des vierten Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,56%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,71%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,55%
Gesteinskörnung 0/1	500,00	2,65	188,68	22,09%
Gesteinskörnung 1/4	402,00	2,65	151,70	17,76%
Fließmittel	3,02	1,10	2,75	0,32%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
			Summe 853,98	100,00%

Aufgrund der bisher erreichten Versuchsergebnisse, wurde für den vierten Versuch das Fließmittel mit 0,65% des Zementanteiles gewählt. Das Ergebnis des vierten Mörtelversuches ist in Tabelle 32 ersichtlich.

Tabelle 32: Ergebnis des vierten Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
272	272
$\beta_p = 6,40$	

Ebenso wie beim zweiten Mörtelversuch ist auch beim vierten Mörtelversuch die Suspension zu flüssig. Wohingegen der β_p -Wert des vierten Versuches schon näher an die nach *Okamura* geforderte Grenze von $\beta_p = 5$ herankommt. In Abb. 46 ist der Ausbreitkuchen des vierten Mörtelversuches dargestellt.



Abb. 46: Ausbreitkuchen des vierten Mörtelversuchs

Fünfter Mörtelversuch

In Tabelle 33 ist die Mischung des fünften Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 33: Mischungsentwurf des fünften Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,58%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,72%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,57%
Gesteinskörnung 0/1	500,00	2,65	188,68	22,11%
Gesteinskörnung 1/4	402,00	2,65	151,70	17,78%
Fließmittel	2,42	1,10	2,20	0,26%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
			Summe 853,43	100,00%

Im fünften Mörtelversuch wurde der Fließmittelanteil gegenüber dem vierten Mörtelversuch wieder auf 0,52% des Zementanteiles gesenkt. Das hat zur Folge dass die Mischung wieder steifer wurde und die Grenze nach *Okamura* wieder nicht eingehalten werden konnte. In Tabelle 34 ist das Versuchsergebnis des fünften Mörtelversuchs ersichtlich.

Tabelle 34: Ergebnis des fünften Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
227	225
$\beta_p = 4,11$	

β_p liegt mit 4,11 wieder unter der Grenze nach *Okamura*, daher wird der Fließmittelanteil für den sechsten Mörtelversuch wieder geringfügig erhöht. In Abb. 47 ist der Ausbreitkuchen des fünften Mörtelversuches dargestellt.



Abb. 47: Ausbreitkuchen des fünften Mörtelversuchs

Sechster Mörtelversuch

In Tabelle 35 ist die Mischung des sechsten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 35: Mischungsentwurf des sechsten Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,57%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,72%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,56%
Gesteinskörnung 0/1	500,00	2,65	188,68	22,11%
Gesteinskörnung 1/4	402,00	2,65	151,70	17,77%
Fließmittel	2,56	1,10	2,33	0,27%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
			Summe 853,55	100,00%

Wie in Tabelle 35 ersichtlich, wurde der Fließmittelanteil nur geringfügig gegenüber dem fünften Mörtelversuch verändert, da dieser mit seinem β_p bereits sehr nahe an der geforderten Grenze liegt. Der Fließmittelanteil wurde auf 0,55% des Zementanteiles angehoben. In Tabelle 36 ist das Versuchsergebnis des sechsten Mörtelversuches ersichtlich.

Tabelle 36: Ergebnis des sechsten Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
232	230
$\beta_p = 4,34$	

Der β_p -Wert mit 4,34 liegt immer noch unter der gesetzten Grenze von 5,0. Eine weitere Anpassung der Mörtelmischung, durch Anhebung des Fließmittelgehaltes, ist daher erforderlich. In Abb. 48 ist der Ausbreitkuchen des sechsten Mörtelversuchs dargestellt.

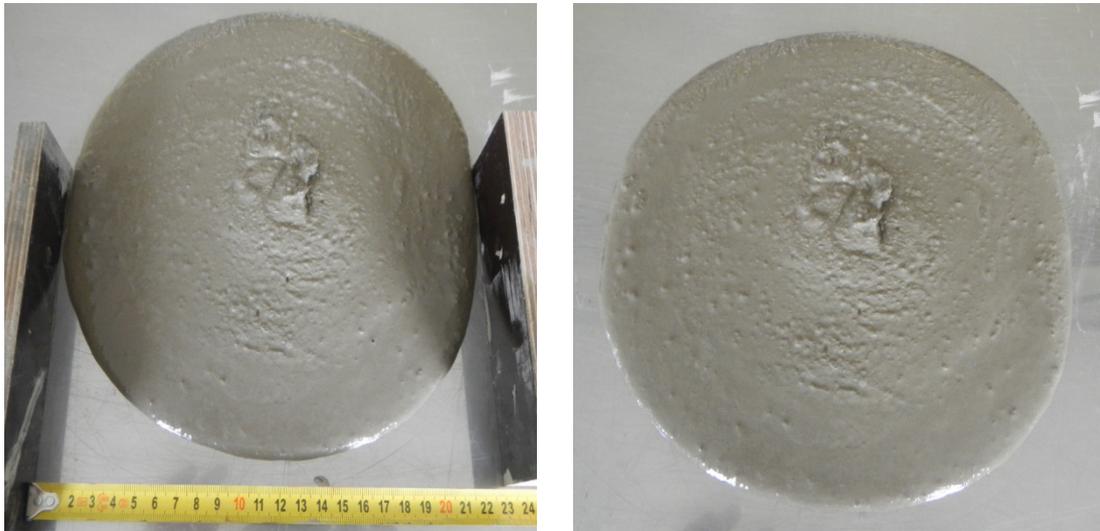


Abb. 48: Ausbreitkuchen des sechsten Mörtelversuchs

Siebenter Mörtelversuch

In Tabelle 37 ist die Mischung des siebenten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 37: Mischungsentwurf des siebenten Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,57%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,71%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,55%
Gesteinskörnung 0/1	500,00	2,65	188,68	22,10%
Gesteinskörnung 1/4	402,00	2,65	151,70	17,77%
Fließmittel	2,79	1,10	2,54	0,30%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
			Summe 853,76	100,00%

Der Fließmittel Anteil wurde von 0,55% auf 0,6%, vom Zementanteil, angehoben. In Tabelle 38 ist ersichtlich das der β_p -Wert bis auf eine Kommastelle genau dem Grenzwert nach *Okamura* von $\beta_p = 5$ entspricht. Somit ist das Ausbreitmaß des Ausbreitkuchens nahe an der 245 mm Grenze, was ebenfalls in Tabelle 38 ersichtlich ist und die Mörtelversuche könnten an dieser Stelle abgeschlossen werden.

Tabelle 38: Ergebnis des siebenten Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
245	247
$\beta_p = 5,05$	

In Abb. 49 ist der Ausbreitkuchen des siebenten Mörtelversuchs dargestellt.



Abb. 49: Ausbreikuchen des siebenten Mörtelversuchs

Da aber nach *Okamura* alle Bestandteile, welche einen Durchmesser von <4mm haben, in die Mörtelmischung zugegeben werden müssen und mit verschiedenen Granulatdurchmessern des Zuschlagstoffes Liapor gearbeitet wurde, wurde für die nächsten Versuchen nochmal die ideale Mischung, inklusive dem Granulat, nach *Okamura* ermittelt. Aus den ersten sieben Mörtelversuchen bekommt man später die Erkenntnis, wie enorm sich das Granulat auf das Fließverhalten des Mörtels und des Betons auswirkt.

4.2.3 Mörtelversuch mit Granulat – Versuchsreihe 8-11

In Tabelle 39 ist die Mischung des achten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 39: Mischungsentwurf des achten Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,52%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,68%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,47%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	7,05%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	6,39%
Fließmittel	2,79	1,10	2,54	0,30%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1-4mm	91,00	0,40	227,50	26,58%
			Summe 855,98	100,00%

In der letzten Zeile der Tabelle 39 sieht man, dass bei der achten Mörtelmischung das erste Mal der Zuschlagstoff Liapor zugemischt wurde. Dieser hätte aufgrund von seiner Granulatstärke bereits in den Mörtelmischungen 1 bis 7 beigemischt werden müssen. Allerdings, wie bereits in 0 erwähnt wurde, ist dieses Granulat sehr stark wassersaugend und

daher wurden die ersten 7 Mörtelversuche ohne de Granulat durchgeführt, um eine zu starke Änderung der Leimmischung zu verhindern. Es ist daher zu erwarten dass die Mörtelsuspension durch die Zugabe des Granulates einen kleineren β_p -Wert hat und dementsprechend ein geringeres Ausbreitfließmaß besitzt. Wie in der Tabelle ebenfalls zu erkennen ist, hat sich der volumetrische Anteil des Zementleimes (Zement, Flugasche und Wasser) gegenüber dem siebenten Versuch nicht verändert. Der Anteil der Gesteinskörnung (0/1 sowie 1/4) hat sich aufgrund der Angaben nach *Okamura*, welche besagt dass nur 40% Anteil feiner Gesteinskörnung im Mörtelvolumen sein dürfen und auch das Liapor zu dieser Gruppe zählt, verändert. In Tabelle 40 ist die prozentuelle Aufteilung der verschiedenen Stoffe angeführt.

Tabelle 40: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des achten Mörtelversuchs

Anteil Leim	59,86%
Anteil feine Gesteinskörnung	40,14%
Summe mit Fließmittel	100,00%

Der Ausbreitkuchen des achten Mörtelversuches hat einen β_p -Wert von 8,52 (siehe Tabelle 41) und ist somit viel zu flüssig. Die daraus gewonnene Erkenntnis: Obwohl das Liaporgranulat sehr stark wassersaugend ist, besitzt die Suspension mit dem Granulat einen größeren β_p -Wert als die Suspension ohne Granulat. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die Mörtelmischungen, wie schon die Leimmischungen, volumetrisch gemischt wurden und das Volumen des Granulates gegenüber seinem Gewicht sehr groß ist, sodass die Gesteinskörnungen auf einen sehr geringen Anteil reduziert werden musste, damit die Grenzen nach *Okamura* eingehalten werden konnten.

Tabelle 41: Ergebnis des achten Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
308	309
$\beta_p = 8,52$	

In Abb. 50 ist der Ausbreitkuchen der achten Mörtelmischung dargestellt.



Abb. 50: Ausbreitkuchen des achten Mörtelversuches

Neunter Mörtelversuch

In Tabelle 42 ist die Mischung des neunten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 42: Mischungsentwurf des neunten Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,53%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,69%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,49%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	7,06%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	6,40%
Fließmittel	2,33	1,10	2,11	0,25%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1-4mm	91,00	0,40	227,50	26,59%
			Summe 855,56	100,00%

Im neunten Mörtelversuch wurde lediglich der Fließmittel Anteil von 0,6% auf 0,5% des Zementanteiles reduziert, um ein geringeres Ausbreitmaß als im achten Mörtelversuch zu erhalten. Das Ergebnis des neunten Mörtelversuchs ist in Tabelle 43 angegeben, das Ausbreitfließmaß besitzt einen β_p -Wert von 7,73.

Tabelle 43: Ergebnis des neunten Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
292	299
$\beta_p = 7,73$	

In Abb. 51 ist der Ausbreitkuchen der neunten Mörtelmischung dargestellt.



Abb. 51: Ausbreitkuchen des neunten Mörtelversuchs

Da dieser Wert immer noch zu groß ist, wurde der Fließmittelanteil abermals gesenkt.

Zehnter Mörtelversuch

In Tabelle 44 ist die Mischung des zehnten Mörtelversuches gegeben.

Tabelle 44: Mischungsentwurf des zehnten Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,54%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,69%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,50%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	7,06%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	6,40%
Fließmittel	1,86	1,10	1,69	0,20%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1-4mm	91,00	0,40	227,50	26,60%
			Summe 855,14	100,00%

Der einzige Unterschied zwischen der zehnten und der neunten Mörtelmischung besteht in einer Verringerung des Fließmittelanteils. Der Anteil wurde auf 0,4% des Zementanteiles angepasst, um ein geringeres Ausbreitfließmaß zu erhalten. Das Ergebnis des Versuches ist in Tabelle 45 angeführt. Die Mischung besitzt einen β_p -Wert von 4,64.

Tabelle 45: Ergebnis des zehnten Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
239	236
$\beta_p = 4,64$	

Der β p-Wert mit 4,64 ist nun erstmals in der zehnten Mischung unterschritten. Nach *Okamura* ist diese Mischung also zu steif und hat keine ausreichenden selbstverdichtenden Eigenschaften. In Abb. 52 ist der Ausbreitkuchen der zehnten Mörtelmischung dargestellt.



Abb. 52: Ausbreitkuchen des zehnten Mörtelversuchs

Elfter Mörtelversuch

Aufgrund der zu plastischen Mischung des zehnten Mörtelversuchs wurde der Anteil an Fließmittel wieder erhöht. Aus dem neunten Mörtelversuch wurde die Erkenntnis gewonnen, dass bei einem Fließmittelanteil von 0,5% des Zementanteiles die Suspension zu flüssig ist. Im Gegensatz dazu wurde aus dem zehnten Mörtelversuch festgestellt, dass bei einem Fließmittelanteil von 0,4% des Zementanteiles die Suspension zu steif ist. Daher wurde für den elften Mörtelversuch ein Mittelwert an Fließmittel der beiden vorherigen Versuche verwendet. In Tabelle 46 ist der Mischungsentwurf des elften Mörtelversuchs gegeben.

Tabelle 46: Mischungsentwurf des elften Mörtelversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	17,54%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	11,69%
Wasser	260,85	1,00	260,85	30,50%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	7,06%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	6,40%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,22%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1-4mm	91,00	0,40	227,50	26,60%
			Summe 855,35	100,00%

Der Fließmittelanteil des elften Mörtelversuchs beträgt 0,45% des Zementanteils. In Tabelle 47 ist das Ergebnis des elften Mörtelversuchs angeführt.

Tabelle 47: Ergebnis des elften Mörtelversuchs

Ausbreitfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
245	247
$\beta_p = 5,05$	

In der Tabelle ist ersichtlich, dass der β_p -Wert bis auf eine Komastelle genau dem Grenzwert nach *Okamura* entspricht. Die Ausbreitversuche des Mörtels können somit endgültig abgeschlossen werden, da alle Bestandteile, welche auch die zukünftigen Betonmischungen beinhaltet und welche $\leq 4\text{mm}$ sind, bereits beigefügt wurden. In Abb. 53 ist der Ausbreitkuchen der elften Mörtelmischung dargestellt.



Abb. 53: Ausbreitkuchen des elften Mörtelversuchs

4.2.4 Kontrolle der Fließzeit

Der zweite wichtige Mörtelversuch ist die Kontrolle der Fließzeit aus dem Auslauftrichter. Der Ablauf des Versuches wurde bereits in Kapitel 2.2.8.2 erklärt. Um ein möglichst gutes Ergebnis zu erhalten, wurde die Mischung des letzten Mörtelversuches insgesamt fünfmal ausgeführt und jeweils die Trichterauslaufzeit gemessen. Bei dem Versuch wird die Auslaufzeit des Mörtels aus dem Trichter gemessen. Die optimale Auslaufzeit beträgt 10 Sekunden. Idealerweise ist eine Modifikation der Mörtelmischung (elfte Mischung) nicht mehr notwendig. In Tabelle 48 ist die Auslaufzeit der fünf Mischungen gegeben.

Tabelle 48: Auslaufzeit des Mörtels

Mörtelmischung	Auslaufzeit [s]
Versuch 11	9
Versuch 11	12
Versuch 11	10
Versuch 11	11
Versuch 11	10
Mittelwert	10,40

Wie in Tabelle 48 ersichtlich, beträgt der Mittelwert der Auslaufzeit 10,4 Sekunden und es ist daher keine weitere Anpassung des Mörtels mehr notwendig.

4.2.5 Aufschwimmkontrolle

Da es sich bei dem Zuschlagsstoff *Liapor* um ein sehr leichtes Granulat handelt, gilt es das Aufschwimmen des Granulates zu verhindern. Durch eine ideale Leim und Mörtelrezeptur sollte dem Aufschwimmen entgegen gewirkt worden sein. Um dies auch zu bestätigen, wurden zwei Plastikrohre mit einer Höhe von 35cm und einem Durchmesser von 3cm mit dem Mörtel der elften Mischung befüllt (siehe Abb. 54). Die Suspension wurde ohne Verdichtungsenergie eingegossen und es wurde eine Woche lang gewartet, damit der Mörtel eine gewisse Festigkeit besitzt.



Abb. 54: Plastikrohr welches mit der Mörtelsuspension befüllt wurde

Nach dem Aushärten wurde das Rohr in 7 Stücke zu je 5 cm Länge zerschnitten und der Querschnitt (Schnittfläche) wurde betrachtet (siehe Abb. 55).



Abb. 55: Querschnitt der Versuchsrohre

In Abb. 55 sind die einzelnen Querschnitte zu erkennen. Links befindet sich der oberste Teil und rechts der unterste Teil des Rohres. Bei genauerer Betrachtung erkennt man, dass sich das Granulat (hier schwarz) im gesamten Rohr gleichmäßig verteilt hat (siehe Abb. 56).

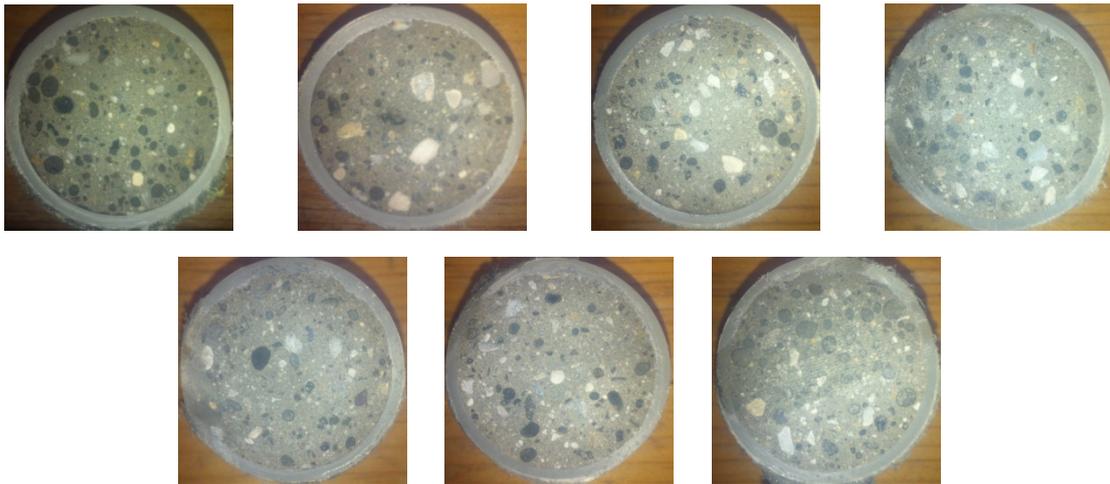


Abb. 56: einzelne Querschnittsflächen des Versuchsrohres von oben nach unten = links nach rechts

In Abb. 57 ist noch einmal der oberste und der unterste Zylinder dargestellt, um die einheitliche Verteilung des Granulates nochmals zu bestätigen.

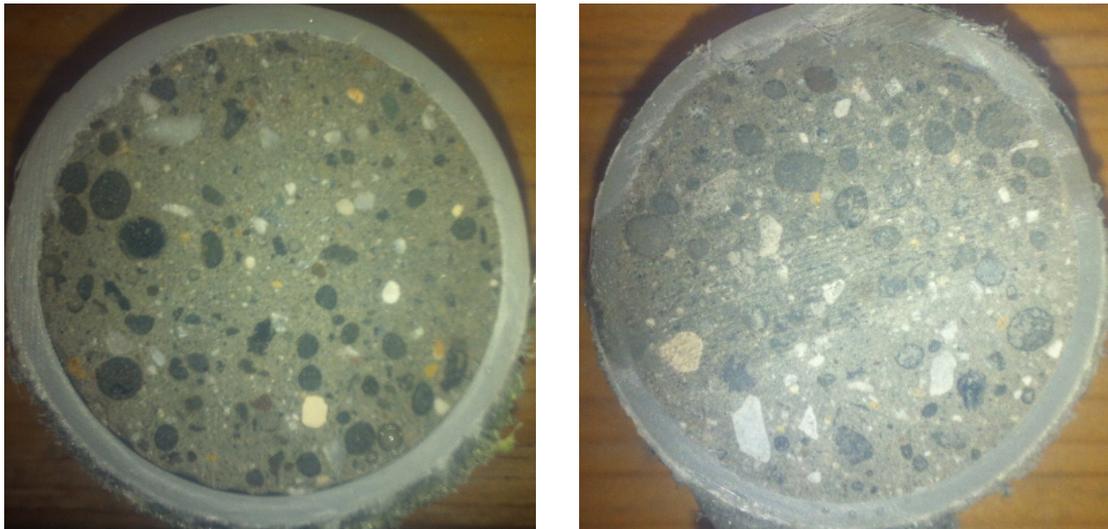


Abb. 57: Oberer (links) und unterer (rechts) Teil des Versuchsrohres

Es ist klar zu erkennen, dass sich das Granulat (schwarz) über die ganze Höhe des Versuchsrohres und auch über den ganzen Querschnitt gleichmäßig verteilt. Da bisher nur mit der Granulatstärke 1/4 mm gearbeitet wurde, aber im Zuge dieser Arbeit auch die Granulat Stärken 4/8 und 8/16 benutzt werden, wurde die elfte Mörtelmischung noch zusätzlich mit je 155 kg/m^3 4/8 und 8/16 mm gemischt und diese ebenfalls in einen Versuchskörper gegossen. Der Versuch diente der Kontrolle, ob das Granulat in der Suspension aufschwimmt oder nicht. Da das Volumen der beiden neuen Granulatstärken größer ist, muss dieser Versuch ebenfalls durchgeführt werden. In Abb. 58 ist das Ergebnis des Versuchs zu erkennen. Als Versuchskörper diente eine einfache Plastikflasche, welche nach dem aushärten die Längsachse entlang aufgeschnitten wurde (siehe Abb. 58).

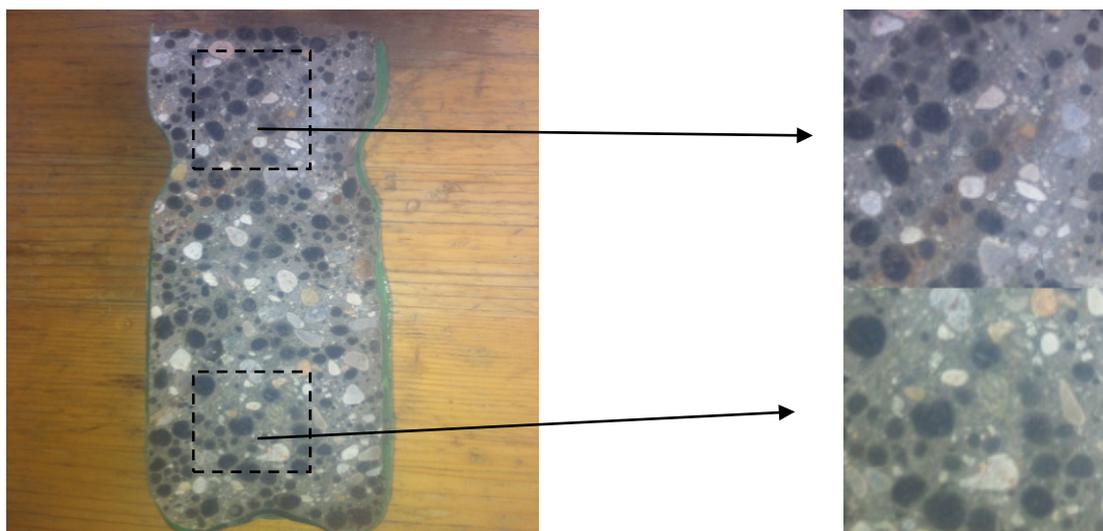


Abb. 58: Längsschnitt der Plastikflasche (links), Detail rechts

In Abb. 58 ist genau zu erkennen, dass sich das Granulat, nicht wie vermutet an die Oberseite absetzt, sondern dass es sich ebenfalls gleichmäßig verteilt. In Tabelle 49 ist der Mischungsentwurf der verwendeten Suspension angegeben.

Tabelle 49: Mischungsentwurf für Aufschwimmversuch

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,29%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,53%
Wasser	260,85	1,00	260,85	14,42%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	3,34%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,02%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1-4mm	91,00	0,40	227,50	12,57%
Liapor 4-8mm	155,00	0,33	476,92	26,36%
Liapor 8-16mm	155,00	0,33	476,92	26,36%
			Summe 1809,19	100,00%

Nach Kontrolle der Fließzeit und des Aufschwimmens, können die Mörtelversuche soweit beendet werden und es kann mit den Betonversuchen begonnen werden.

4.3 Betonversuche - Versuchsreihe 1 bis 11

Die Betonversuche bilden den letzten Arbeitsschritt bei der Entwicklung eines Betons. Sie werden aufbauend auf die Mörtelversuche durchgeführt. Zu der Suspension, welche in den Mörtelversuchen erzeugt wurde, werden nun die groben Gesteinskörnungen, in dem zu Beginn bereits festgelegten Anteil am Gesamtstoffraum zugegeben (siehe Abb.5). Der Gehalt an grober Gesteinskörnung (> 4mm) wird mit 50% im Betonvolumens angenommen. Die Versuche wurden ebenso wie die Leim- und Mörtelversuche, aufeinander aufbauend durchgeführt, um möglichst rasch und unkompliziert zu einem gewünschten Ergebnis zu gelangen. Es wurden das Setzfließmaß (siehe 2.2.8.3) und die Festigkeiten des Betons bestimmt. Ziel ist es, beim Fließversuch ein Setzfließmaß von 65 bis 75 cm zu erhalten. Dies entspricht einem β_p -Wert von 41,25 bis 55,25. Der Mischungsentwurf basiert komplett auf dem fertigen Mörtel und wird lediglich, wie bereits erwähnt, durch die grobe Gesteinskörnung erweitert, aber auch mittels Fließ- und Stabilisierungsmitteln in die gewünschte Konsistenz gebracht.

Erster Betonversuch

In Tabelle 50 ist der Mischungsentwurf des ersten Betonversuches gegeben.

Tabelle 50: Mischungsentwurf des ersten Betonversuches

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,78%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,85%
Wasser	260,85	1,00	260,85	15,27%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	3,53%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,20%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,31%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	27,01%
Liapor 8/16	120,00	0,33	369,23	21,61%
Gesteinskörnung 4/8	60,00	2,65	22,64	1,33%
			Summe 1708,76	100,00%

Vergleicht man den Mischungsentwurf des elften Mörtelversuches (siehe Tabelle 46) mit dem Mischungsentwurf des ersten Betonversuches (siehe Tabelle 50) erkennt man, dass sich der Mischungsentwurf des Betons lediglich um drei Komponenten des Mörtelmischungsentwurfs unterscheidet. Diese drei Komponenten sind die groben Zuschlagsstoffe des Betons. Wie bereits erwähnt, müssen diese 50% des Gesamtvolumens des Betons ausmachen. In Tabelle 51 ist die Volumina Aufteilung des ersten Betonversuches angegeben.

Tabelle 51: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des ersten Betonversuches

Anteil Leim	29,90%
Anteil feine Gesteinskörnung	20,05%
Anteil grobe Gesteinskörnung	49,94%
Summe (mit Fließmittel und Stabilisator)	100,00%

Bei der Durchführung des ersten Betonversuches war sofort zu erkennen, dass die Mischung viel zu steif ist. Daher wurde auch keine Messung des Durchmessers und damit auch keine Bestimmung des Setzfließmaßes vorgenommen.

Zweiter Betonversuch

Im zweiten Betonversuch wurde nun versucht, nach Kenntnis des ersten Versuches, den Beton flüssiger zu machen. Aufgrund der sehr starken Wasseraufnahmefähigkeit des Granulates wurde der Anteil von diesem sehr stark verringert. Daher ist der Anteil der Gesteinskörnung 4/8 gestiegen, um die geforderten 50% Volumen an grober Gesteinskörnung im Beton zu gewährleisten. In Tabelle 52 ist der Mischungsentwurf des zweiten Betonversuches gegeben.

Tabelle 52: Mischungsentwurf des zweiten Betonversuches

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,69%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,80%
Wasser	260,85	1,00	260,85	15,12%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	3,50%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,17%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,19%
Liapor 4/8	71,00	0,33	218,46	12,66%
Liapor 8/16	40,00	0,33	123,08	7,13%
Gesteinskörnung 4/8	1400,00	2,65	528,30	30,62%
			Summe 1725,18	100,00%

Vergleicht man die ersten beiden Mischungsentwürfe, so stellt man fest, dass die Mörtelrezeptur abermals unverändert geblieben ist. Die Anteile der groben Gesteinskörnungen haben sich allerdings stark verändert. In Tabelle 53 ist die prozentuelle Veränderung der groben Gesteinskörnungen gegeben.

Tabelle 53: Unterscheid von erster zu zweiter Betonmischung

	Betonversuch 1 [kg/m ³]	Betonversuch 2 [kg/m ³]	Unterschied [%]
Liapor 4/8	150,00	71,00	47,33
Liapor 8/16	120,00	40,00	33,33
Gesteinskörnung 4/8	60,00	1400,00	2333,33

Durch die Minimierung des Granulates 4/8 auf zirka die Hälfte und des Granulates 8/16 auf ein Drittel, muss das nun entstandene Volumen mittels der Gesteinskörnung gefüllt werden. Das führt zu einer mehr als 20fachen Erhöhung der Gesteinskörnung. Anhand von diesen Zahlen ist gut zu erkennen, wie leicht das Granulat im Bezug zu seinem Volumen ist. In Tabelle 54 ist die Volumina Aufteilung des zweiten Betonversuches gegeben.

Tabelle 54: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des zweiten Betonversuches

Anteil Leim	29,61%
Anteil feine Gesteinskörnung	19,86%
Anteil grobe Gesteinskörnung	50,42%
Summe (mit Fließmittel und Stabilisator)	100,00%

Wie schon in Tabelle 51 ist auch in Tabelle 54 zu sehen, dass der Anteil der groben Gesteinskörnung 50% beträgt.

Da die Mischung wieder viel zu steif war, wurde abermals nicht der Durchmesser gemessen. Aufgrund des überraschenden Ergebnisses wurde die zweite Betonmischung ein weiteres Mal hergestellt, was aber wieder zu einem zu steifen Beton führte.

Dritter Betonversuch

Nach Kenntnis der ersten beiden Betonversuche, wurde im dritten Betonversuch das erste Mal auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Granulates Rücksicht genommen und es wurde das Wasser, welches bereits während des Mischungsvorganges vom Granulat gespeichert wird, als zusätzliches Wasser der Mischung beigegeben. Die Berechnung des zusätzlichen Wasseranteiles ist in Tabelle 55 gegeben.

Tabelle 55: Zusätzlicher Wasseranteil durch die Saugfähigkeit des Granulates

Liapor [mm Ø]	Wasser pro 100 g [g]	Zusätzliches Wasser [g]
1/4	59,70	54,33
4/8	33,79	23,99
8/16	35,93	14,37
		Summe 92,69

In der mittleren Spalte der Tabelle 55 ist der Anteil an Wasser angegeben, welcher pro 100g der jeweiligen Granulatstärke notwendig ist, um die Saugfähigkeit des Granulates abzudecken. In der rechten Spalte ist die Wassermenge angegeben, die für den dritten Betonversuch notwendig ist. In Tabelle 56 ist der Mischungsentwurf des dritten Betonversuches gegeben.

Tabelle 56: Mischungsentwurf der dritten Betonmischung

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,60%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,74%
Wasser	278,95	1,00	278,95	16,00%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	3,46%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,14%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,05%
Liapor 4/8	71,00	0,33	218,46	12,53%
Liapor 8/16	40,00	0,33	123,08	7,06%
Gesteinskörnung 4/8	1400,00	2,65	528,30	30,31%
			Summe 1743,28	100,00%

Vergleicht man die beiden Mischungsentwürfe des zweiten und dritten Betonversuches, so stellt man fest, dass lediglich der Wassergehalt der Mischungen voneinander abweicht. Der W/B-Wert der dritten Betonmischung beträgt 0,40 und nicht wie aus den Leimversuchen bestimmt worden war, 0,37. Obwohl die Wassersaugfähigkeit des Granulates berücksichtigt wurde, war die Mischung wieder viel zu steif und es wurden abermals kein Setzfließmaß und kein Durchmesser bestimmt.

Vierter Betonversuch

Aufgrund der Tatsache dass, die ersten drei Betonmischungen zu steif waren und weiteres das Phänomen beobachtet werden konnte dass sich das Granulat mit der Stärke 8/16 als nicht fließfähig herausgestellt hatte, wurde der Anteil dieser Granulat Stärke auf Null gesenkt. In Tabelle 57 ist der Mischungsentwurf des vierten Betonversuches gegeben. Zu erkennen ist, dass sich der Anteil des Granulates mit der Stärke 4/8 erhöht hat und der Anteil der Gesteinskörnung 4/8 verringert hat. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass durch eine geringe Gewichtszunahme ein großes Volumen gefüllt werden kann. Die Saugfähigkeit des Granulates wurde nicht berücksichtigt, damit man den vierten und den zweiten Betonversuch miteinander vergleichen kann.

Tabelle 57: Mischungsentwurf der vierten Betonmischung

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,77%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,85%
Wasser	260,85	1,00	260,85	15,25%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	3,53%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,20%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,30%
Liapor 4/8	200,00	0,33	615,38	35,98%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	635,00	2,65	239,62	14,01%
			Summe 1710,35	100,00%

Erwartungsgemäß führte auch die vierte Betonmischung zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis, da der Beton wieder viel zu steif war und abermals keine Versuche durchgeführt werden konnten.

Fünfter Betonversuch

Im fünften Betonversuch wurde, wie schon im vierten Betonversuch, das Granulat mit der Stärke 8/16 nicht mehr beigemischt. Des Weiteren wurde in dieser Mischung, wie schon in der dritten Mischung, die Wasseraufnahmefähigkeit des Granulates berücksichtigt. Die Berechnung des zusätzlichen Wasseranteiles ist in Tabelle 58 gegeben.

Tabelle 58: Zusätzlicher Wasseranteil durch die Saugfähigkeit des Granulates

Liapor [mm]	Wasser pro 100 g [g]	Zusätzliches Wasser [g]
1/4	59,70	54,33
4/8	33,79	67,58
8/16	35,93	0,00
		Summe 121,91

Wie schon beim dritten Betonversuch erhöht sich durch die Zugabe des Wassers der W/B-Wert auf 0,40. Der Mischungsentwurf der fünften Betonmischung ist in Tabelle 59 gegeben.

Tabelle 59: Mischungsentwurf des fünften Betonversuches

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,65%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,77%
Wasser	284,45	1,00	284,45	16,40%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	3,48%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,16%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,12%
Liapor 4/8	200,00	0,33	615,38	35,49%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	635,00	2,65	239,62	13,82%
			Summe 1733,95	100,00%

Die fünfte Betonmischung war, wie bereits bei allen vorherigen Betonmischungen viel zu steif und es wurden daher keine Versuche durchgeführt.

Sechster Betonversuch

Nach *Okamura* darf der Wasseranteil in den Betonmischungen um bis zu 15% reduziert, oder bis zu 10% erhöht werden [18]. Um die Fließfähigkeit des Betons zu erhöhen, wurde der Wasseranteil um 10% erhöht. Der Mischungsentwurf der sechsten Betonmischung ist in Tabelle 60 gegeben.

Tabelle 60: Mischungsentwurf der sechsten Betonmischung

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,51%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,67%
Wasser	312,89	1,00	312,89	17,75%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	3,43%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,10%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	12,91%
Liapor 4/8	200,00	0,33	615,38	34,92%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	635,00	2,65	239,62	13,60%
			Summe 1762,40	100,00%

In der Mischung wurde auch die Wasseraugfähigkeit berücksichtigt und der zusätzliche Wasserbedarf wurde ebenfalls um 10% erhöht. Der sechste Betonversuch führte zu einem, zumindest messbaren Ergebnis, wobei das Setzfließmaß noch nicht die gewünschten Grenzen erreicht hat. In Tabelle 61 ist das Setzfließmaß in die beiden Richtungen des Ausbreitkuchens angegeben.

Tabelle 61: Ergebnis des sechsten Betonversuches

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
445	444
$\beta_p = 18,76$	

In Tabelle 61 erkennt man, dass die beiden Durchmesser um mehr als 200 mm zu klein sind und dem zufolge auch der β_p -Wert mit 18,76 viel zu klein ist. Allerdings konnte das erste Mal eine Mischung für die Versuchszwecke verwendet werden.

Siebenter Betonversuch

Um die siebente Betonmischung flüssiger zu machen, muss auch bei den Betonmischungen, wie schon bei den Leim- und Mörtelmischungen, von dem Entwicklungskonzept nach *Okamura* abgewichen werden. In der sechsten Betonmischung befinden sich bereits das zusätzliche Wasser für die Granulatsaugfähigkeit und das maximal zulässige Wasser nach *Okamura*. Daher muss die Fließfähigkeit des Betons entweder durch mehr Wasser oder durch mehr Fließmittel erreicht werden. Im siebenten Betonversuch wurde lediglich der Wasseranteil erhöht, um die Auswirkungen zu erkennen, welche die Änderung von nur einem Bestandteil auf die Mischung hat. Der Mischungsentwurf der siebenten Betonmischung ist in Tabelle 62 gegeben.

Tabelle 62: Mischungsentwurf der siebenten Betonmischung

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,01%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,34%
Wasser	424,00	1,00	424,00	22,63%
Gesteinskörnung 0/1	160,00	2,65	60,38	3,22%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	2,92%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,10%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	12,14%
Liapor 4/8	200,00	0,33	615,38	32,85%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	635,00	2,65	239,62	12,79%
			Summe 1873,50	100,00%

Die siebente Betonmischung hat einen W/B-Wert von 0,60. Der Wert ist damit wesentlich höher, als der Wert welcher in den Leimversuchen ermittelt wurde. Der Versuch, mit der in der Tabelle 62 angeführten Mischung, führt zu einem messbaren Ergebnis, welches in Tabelle 63 angeführt ist.

Tabelle 63: Ergebnis des siebenten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
780	850
$\beta_p = 65,42$	

In Tabelle 63 erkennt man, dass die beiden Ergebnisse das maximale Ausbreitmaß von 750,00 mm überschreiten und die Mischung damit zu flüssig ist. Dementsprechend ist auch der β_p -Wert mit 65,42 zu groß. In Abb. 59 ist das Ergebnis des siebenten Betonversuches dargestellt.



Abb. 59: Ausbreitkuchen des siebenten Betonversuchs

Abb. 59 macht deutlich, dass die Mischung des siebenten Betonversuchs entmischt. Das bedeutet, dass die in der Mischung enthaltenen Bestandteile nicht mehr gleichmäßig verteilt sind. Der dunkle Kreis in der Mitte der Abbildung besteht zum Großteil aus dem Granulat, welches bereits im Versuchstrichter aufgeschwommen ist und daher nach dem heben des Trichters als Letzter austritt. Nach außen hin werden die Bestandteile immer feiner, bis schlussendlich ganz außen nur noch Wasser mit ganz feinen Schwebstoffen übrig bleibt. Der Beton des siebenten Versuchs ist zwar flüssiger als alle bisherigen Versuche, da es aber zu einer Entmischung kommt, ist dieser Beton unbrauchbar.

Achter Betonversuch

Um der Entmischung im siebenten Versuch entgegen zu wirken, wurde der Anteil an feiner Gesteinskörnung im achten Versuch erhöht, damit es im Zentrum des Ausbreitkuchens zu keiner Ansammlung von groben Gesteinskörnungen und am Rand des Ausbreitkuchens zu keinem Wasseraustritt kommt. Der Mischungsentwurf der achten Betonmischung ist in Tabelle 64 gegeben.

Tabelle 64: Mischungsentwurf der achten Betonmischung

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,53%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,68%
Wasser	424,00	1,00	424,00	24,10%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,58%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,11%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	12,93%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	26,23%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	500,00	2,65	188,68	10,72%
			Summe 1759,28	100,00%

Vergleicht man die Angaben in Tabelle 62 mit denen in Tabelle 64 erkennt man, dass der Anteil der Gesteinskörnung 0/1 erheblich vergrößert wurde. Es wird davon ausgegangen, dass die feineren Anteile der Mischung Sieben einen zu kleinen Anteil an der Gesamtmischung hatten und daher konnte der Hohlraum zwischen den groben Gesteinskörnungen nicht gefüllt werden, was weiteres zu einer Entmischung, wie in Abb. 59 ersichtlich, führte. Durch die Anhebung des Anteiles der Gesteinskörnung 0/1 und das Beibehalten einer sonst unveränderten Mischung, entspricht die Zusammensetzung nicht mehr der idealen Zusammensetzung nach *Okamura* (siehe Abb.5). In Tabelle 65 ist die Volumina Aufteilung des achten Betonversuches gegeben.

Tabelle 65: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des achten Betonversuches

Anteil Leim	38,31%
Anteil feine Gesteinskörnung	24,62%
Anteil grobe Gesteinskörnung	36,96%
Summe (mit Fließmittel und Stabilisator)	100,00%

Die achte Betonmischung war ebenso wie die siebente Betonmischung, viel zu flüssig und es kam, trotz der Anhebung der Feianteile, zu einer Entmischung.

Neunter Betonversuch

Aufgrund der zu flüssigen Konsistenz der letzten beiden Versuchsmischungen, wurde im neunten Betonversuch der W/B-Wert wieder auf 0,42 gesenkt. Des Weiteren wurde die Gesteinskörnung 4/8 ebenfalls um 100 kg/m³ gesenkt, um eine bessere Hohlraumfüllung zwischen den groben Zuschlagstoffen durch die feinen Zuschlagstoffe zu gewährleisten. In Tabelle 66 ist der Mischungsentwurf des neunten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 66: Mischungsentwurf des neunten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	9,43%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	6,29%
Wasser	293,00	1,00	293,00	18,42%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	9,49%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,44%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,12%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	14,30%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	29,02%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	9,49%
			Summe 1590,54	100,00%

Der W/B-Wert von 0,42 entspricht wieder dem maximal zulässigen Wert. Der Wasseranteil setzt sich aus den Leimversuchen, der Granulatsaugfähigkeit und der maximalen Erhöhung von 10% nach *Okamura* zusammen. Das Ergebnis des achten Betonversuchs ist in Tabelle 67 angeführt.

Tabelle 67: Ergebnis des neunten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
345	352
β_p = 11,15	

Das Setzfließmaß der neunten Betonmischung ist ebenfalls zu gering und der Ausbreitkuchen erreicht nicht den erwünschten Durchmesser. Das Ergebnis ist in Abb. 60 dargestellt.

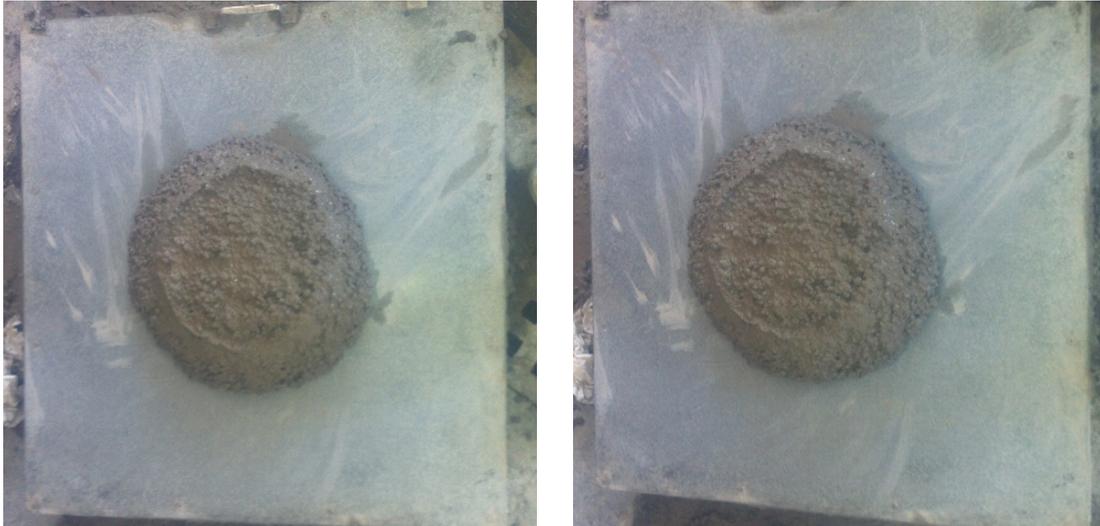


Abb. 60: Ausbreitkuchen des neunten Betonversuchs

Zehnter Betonversuch

In Tabelle 68 ist der Mischungsentwurf des zehnten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 68: Mischungsentwurf des zehnten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	9,13%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	6,09%
Wasser	345,00	1,00	345,00	21,00%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	9,19%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,33%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,12%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,85%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	28,10%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	9,19%
			Summe 1642,54	100,00%

Vergleicht man die beiden Mischungsentwürfe der neunten und zehnten Betonversuche in Tabelle 66 und Tabelle 68 stellt man fest, dass lediglich der Wasseranteil erhöht wurde, um die Mischung flüssiger zu machen. Der W/B-Wert beträgt 0,49. In Tabelle 69 ist das Ergebnis des zehnten Betonversuchs angeführt.

Tabelle 69: Ergebnis des zehnten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
693	718
$\beta_p = 48,77$	

Das Setzfließmaß befindet sich zwischen den beiden Grenzwerten von 650 und 750 mm. Es kam auch zu keiner Entmischung der einzelnen Bestandteile. Die Mischung kann somit verwendet werden um eine Reihe von Probekörpern herzustellen.

Um diese herstellen zu können und um die zehnte Betonmischung zu überprüfen, wurde dieselbe Betonmischung ein zweites Mal hergestellt. Das Ergebnis dieser Mischung ist in Tabelle 70 angeführt.

Tabelle 70: Ergebnis der Kontrollmischung

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
495	460
$\beta_p = 21,80$	

Vergleicht man die Ergebnisse der Tabelle 70 mit jener der Tabelle 69 stellt man fest, dass das Setzfließmaß und somit auch der β_p -Wert erheblich voneinander abweichen. Um die Richtigkeit des zehnten Betonversuchs zu bestätigen, wurde die Mischung ein drittes Mal hergestellt und das Setzfließmaß bestimmt. In Tabelle 71 ist das Ergebnis des dritten Versuches angeführt.

Tabelle 71: Weiteres Ergebnis der Kontrollmischung

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
547	432
$\beta_p = 22,96$	

Die Ergebnisse der Tabelle 71 und der Tabelle 70 ähneln einander, wohingegen das Ergebnis der Tabelle 69 stark von ihnen abweicht. Die Abweichung der Ergebnisse zueinander ist darauf zurückzuführen, dass nach dem ersten der drei Versuche ein neuer Sack Zement geöffnet wurde. Obwohl der Mischungsentwurf für alle drei Versuchsergebnisse exakt der gleiche war, entstand durch die Verwendung des vermutlich alten Zementes im ersten Versuch ein deutlich unterschiedliches Ergebnis.

Elfter Betonversuch

Im elften Betonversuch wurde der Wasseranteil wieder angehoben, damit die Mischung aus dem zehnten Versuch flüssiger wurde. In Tabelle 72 ist der Mischungsentwurf des elften Betonversuchs gegeben.

Tabelle 72: Mischungsentwurf des elften Versuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,90%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,93%
Wasser	388,00	1,00	388,00	23,02%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,96%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,25%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,00	1,02	0,00	0,00%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,50%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	27,38%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,96%
			Summe 1685,54	100,00%

Durch die Erhöhung des Wasseranteiles wurde die Mischung wieder flüssiger. Der W/B-Wert erhöht sich auf 0,55. Das Ergebnis des elften Betonversuchs ist in Tabelle 73 angeführt.

Tabelle 73: Ergebnis des elften Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
694	707
$\beta_p = 48,07$	

Das Ergebnis des elften Betonversuchs ist in Abb. 61 dargestellt.





Abb. 61: Ausbreitkuchen des elften Betonversuchs

Das Ergebnis in Tabelle 73 liegt zwar genau zwischen den geforderten Grenzen von 650 bis 750 mm und wäre daher eine ideale Lösung. Bei Betrachtung der oberen beiden Abbildungen in Abb. 61 erkennt man jedoch, dass es zu einer leichten Entmischung des Betons kommt. Gut zu erkennen ist, dass die schweren Zuschlagstoffe eher in der Mitte und die leichten Zuschlagstoffe eher am Rand des Ausbreitkuchens zum liegen kommen. Am rechten unteren Bild in Abb. 61 ist diese Aussage nochmal visuell bestätigt. Daher können auch aus der elften Versuchsreihe keine Probekörper hergestellt werden.

4.3.1 Stabilisierer

Stabilisierer erhöhen den Zusammenhalt der einzelnen Bestandteile des Frischbetons. Mit ihrer Hilfe kann dem Entmischen gegengesteuert werden. Sie machen den Frischbeton gleitfähiger und besser verarbeitbar.

4.3.2 Betonversuche mit Stabilisierungsmittel- Versuchsreihe 12 bis 14

Aufgrund der Tatsache, dass die elfte Betonmischung die Grenzen des Setzfließmaßes ideal erfüllte, aber ebenso wie bei der siebenten Mischung das Phänomen der Entmischung eintrat, konnte der Wasseranteil unverändert übernommen werden. Um der Entmischung entgegen zu wirken, wurde in den kommenden Versuchen, neben dem bereits vorhandenen Fließmittel, auch noch ein Stabilisierungsmittel zugegeben. In Tabelle 74 ist der Mischungsentwurf des zwölften Betonversuchs gegeben.

Tabelle 74: Mischungsentwurf des zwölften Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,89%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,93%
Wasser	388,00	1,00	388,00	23,01%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,95%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,24%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	1,00	1,02	0,98	0,06%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,49%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	27,37%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,95%
			Summe 1686,52	100,00%

Der Anteil des Stabilisators beträgt lediglich 0,22% des Zementanteils. In Tabelle 75 ist das Ergebnis des zwölften Betonversuchs angeführt.

Tabelle 75: Ergebnis des zwölften Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
503	535
$\beta_p = 25,94$	

Vergleicht man die beiden Ergebnisse des elften und zwölften Betonversuchs (Tabelle 73 und Tabelle 75) stellt man fest, dass die Zugabe des Stabilisators einen großen Einfluss auf das Setzfließmaß hat. Das Ergebnis des zwölften Betonversuchs ist Abb. 62 in dargestellt.



Abb. 62: Ausbreitkuchen des zwölften Betonversuchs

Betrachtet man den Ausbreitkuchen des zwölften Betonversuchs erkennt man, dass dieser das notwendige Setzfließmaß nicht erreicht. Betrachtet man allerdings nur den Rand des Ausbreitkuchens (siehe rechte Abbildung von Abb. 62) ist klar zu erkennen dass es im zwölften Betonversuch, dank des Stabilisierungsmittels, zu keiner Entmischung kommt.

Dreizehnter Betonversuch

In Tabelle 76 ist der Mischungsentwurf des dreizehnten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 76: Mischungsentwurf des dreizehnten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,90%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,93%
Wasser	388,00	1,00	388,00	23,01%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,95%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,25%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,50	1,02	0,49	0,03%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,49%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	27,37%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,95%
			Summe 1686,03	100,00%

Die Mischung ist, bis auf die Halbierung des Stabilisators, ident mit der des zwölften Betonversuchs. In Tabelle 77 ist das Ergebnis des dreizehnten Betonversuchs angeführt.

Tabelle 77: Ergebnis des dreizehnten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
535	556
β_p = 28,76	

Durch die Halbierung des Stabilisators wurde das Setzfließmaß zwar vergrößert, es ist aber noch immer unter dem unteren Grenzwert von 650 mm. Eine weitere Verkleinerung des Stabilisatoranteils ist daher notwendig.

Vierzehnter Betonversuch

In Tabelle 78 ist der Mischungsentwurf des vierzehnten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 78: Mischungsentwurf des vierzehnten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,90%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,93%
Wasser	388,00	1,00	388,00	23,02%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,95%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,25%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,20	1,02	0,20	0,01%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	13,50%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	27,38%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,95%
			Summe 1685,74	100,00%

Die Mischung ist, so wie schon die dreizehnte Mischung, bis auf den Stabilisatoranteil ident mit der zwölften Mischung. Der Anteil des Stabilisators wurde eine weiteres mal gesenkt, um das gewünschte Setzfließmaß zu erreichen. Sein Anteil beträgt nur noch 0,04% des Zementanteils. In Tabelle 79 ist das Ergebnis des vierzehnten Betonversuchs angeführt.

Tabelle 79: Ergebnis des vierzehnten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
650	655
β_p = 41,58	

Die Mischung des vierzehnten Versuches liegt fast exakt auf dem unteren Grenzwert von β_p = 41,25. Das Ergebnis des vierzehnten Betonversuchs ist in Abb. 63 dargestellt.

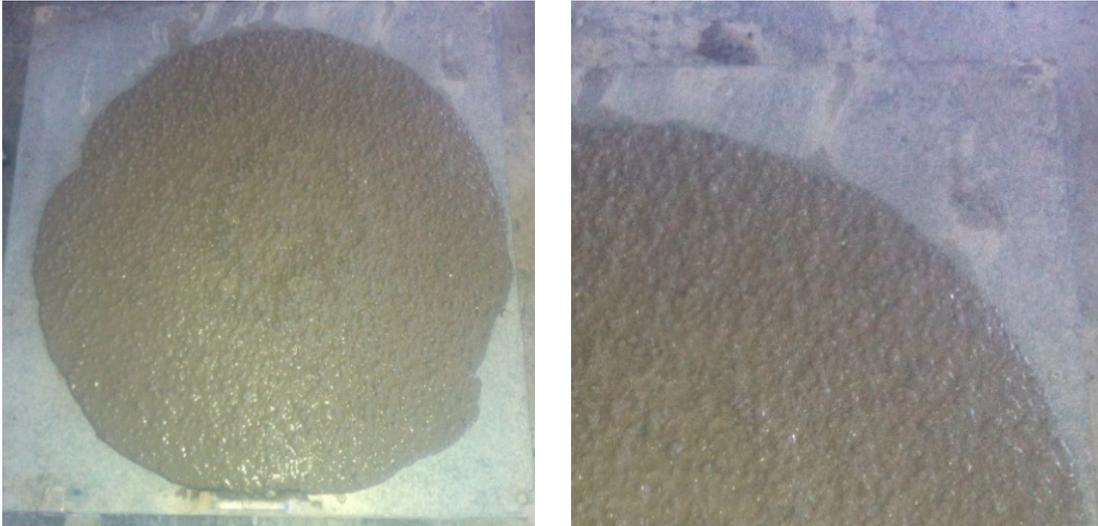


Abb. 63: Ausbreitkuchen des vierzehnten Versuchs

Da die Grenzen des Setzfließmaßes eingehalten werden und der Beton, wie in Abb. 63 ersichtlich ist, nicht Entmischt, ist die Entwicklung eines selbstverdichtenden Leichtbetons abgeschlossen und es können die ersten Prüfkörper betoniert werden.

4.4 Bestimmung der Betonfestigkeit

Es wurden insgesamt sechs Versuchskörper hergestellt (siehe Abb. 64). Für diese wurde die Mischung der vierzehnten Versuchsreihe verwendet.



Abb. 64: Versuchskörper des vierzehnten Betonversuchs

Nach dem Ausschalen der Prüfkörper wurde als erster deren Raumgewicht bestimmt und auf 1 m^3 hochgerechnet. Das Raumgewicht der jeweiligen Prüfkörper ist in Tabelle 80 angeführt.

Tabelle 80: Kubatur und Gewicht der ersten sechs Versuchskörper

Versuchskörper	Gewicht [g]	Volumen [cm ³]	Raumgewicht [kg/m ³]
1A	422,60	260,48	1622,37
1B	445,30	266,38	1671,68
1C	440,50	264,29	1666,73
2A	416,60	258,95	1608,80
2B	425,50	260,55	1633,09
2C	430,80	260,80	1651,82

In der letzten Spalte der Tabelle sieht man, dass die Raumgewichte beider Versuchsreihen innerhalb der geforderten Grenzen für Leichtbeton liegen. Die sechs Proben wurden mittels eines Biegeversuchs und eines Druckversuchs ausgewertet. Aufgrund von Problemen bei der ersten Messung, gibt es zur Versuchsreihe 1A bis 1C leider keine Ergebnisse aus dem Biegeversuch. Die wichtigeren Ergebnisse aus dem Druckversuch sind allerdings vorhanden. In Abb. 65 sind die Ergebnisse des Druckversuchs der ersten Versuchsreihe dargestellt. Da beim Biegeversuch jeder Versuchskörper in der Mitte geteilt wurde, ergeben sich aus drei Versuchskörpern für den Biegeversuch, sechs Versuchskörper für den Druckversuch.

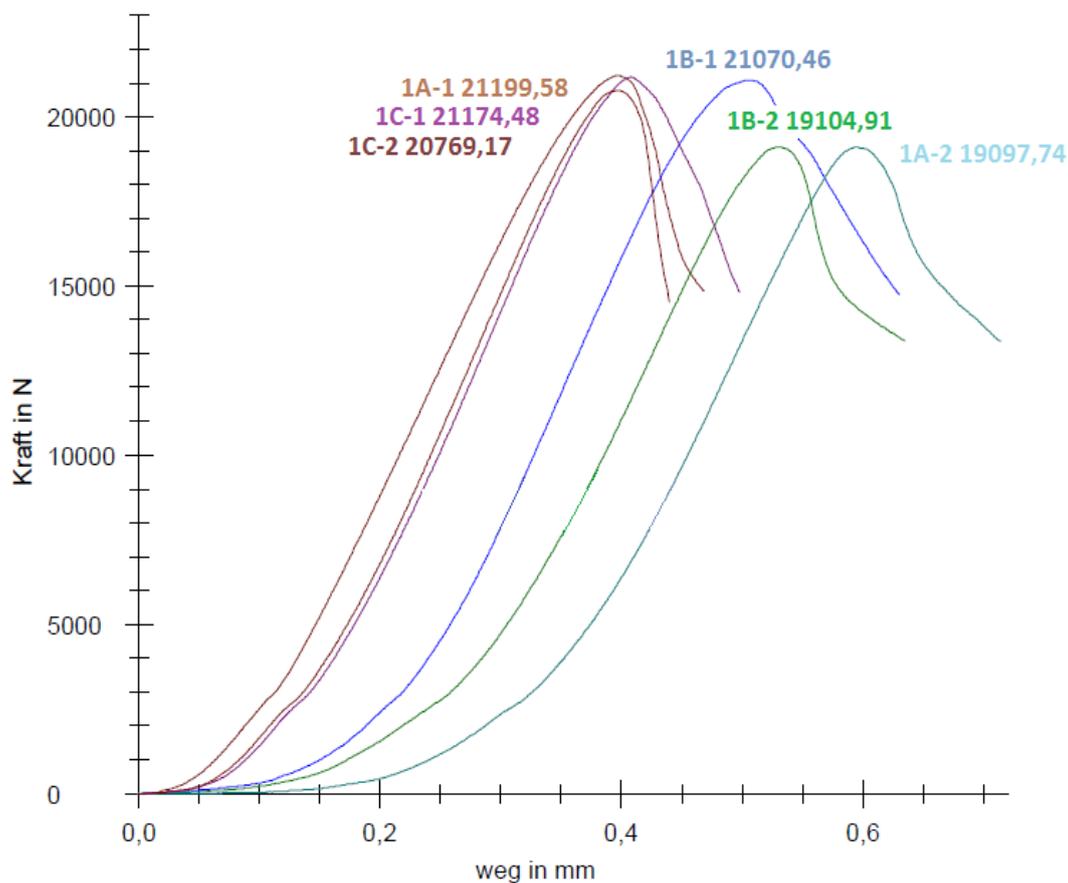


Abb. 65: Ergebnisse der ersten Druckversuchsreihe (1A-1 bis 1C-2)

In der Abbildung sieht man, dass die Versuchskurven einen ähnlichen Verlauf haben, was darauf schließen lässt, dass die einzelnen Versuchskörper eine ähnliche Betonstruktur aufweisen. In Tabelle 81 sind die Ergebnisse der ersten Druckversuchsreihe numerisch angeführt.

Tabelle 81: Ergebnisse der ersten Druckversuchsreihe (1A-1 bis 1C-2)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
1A-1	1600	21199,58	13,25
1A-2	1600	19097,74	11,94
1B-1	1600	21070,46	13,17
1B-2	1600	19104,91	11,94
1C-1	1600	21174,48	13,23
1C-2	1600	20769,17	12,98

In der letzten Spalte der Tabelle sind die Spannungen der jeweiligen Versuche ermittelt worden. Der Versuchskörper 1A-1 ist mit 13,25 N/mm² der stabilste. In Abb. 66 sind alle Querschnitte der Versuchskörper abgebildet.



Abb. 66: Querschnitte der Versuchskörper 1A bis 1C (von links nach rechts)

In der Abbildung ist schön zu erkennen, dass sich das Granulat über den gesamten Querschnitt verteilt hat.

Aus den zweiten drei Versuchskörpern wurde der Biegeversuch dokumentiert, das Ergebnis ist in Abb. 67 dargestellt.

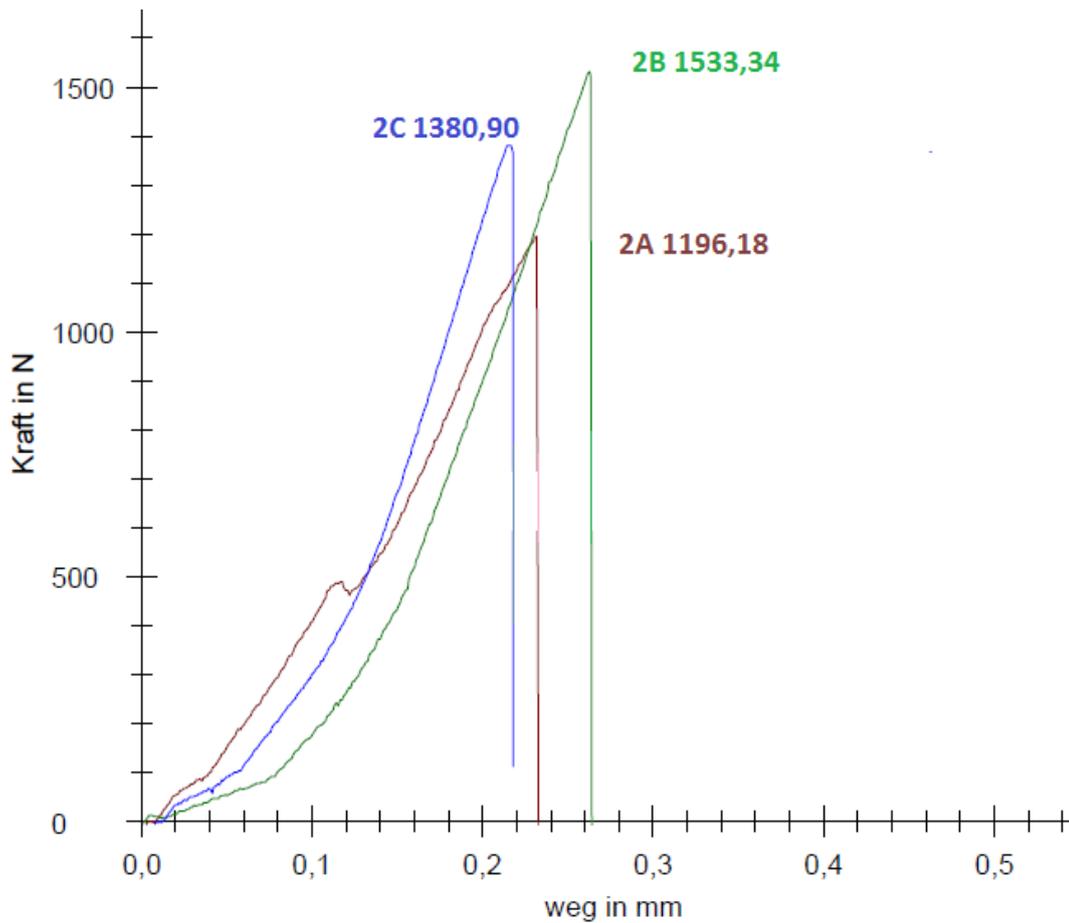


Abb. 67: Ergebnis der zweiten Biegeversuchsreihe (2A bis 2C)

Der Verlauf der Belastungskurven ist relativ ident, was auf eine Gleichmäßigkeit der Prüfkörper zurückzuführen ist. Die Ergebnisse des zweiten Biegeversuchs sind in Tabelle 82 numerisch angeführt.

Tabelle 82: Ergebnis des zweiten Biegeversuchs

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
2A	1600	1196,18	2,80
2B	1600	1533,34	3,59
2C	1600	1380,90	3,24

Nach dem Biegeversuch wurde auch für die zweite Versuchsreihe der Druckversuch durchgeführt. In Abb. 68 sind diese Ergebnisse dargestellt.

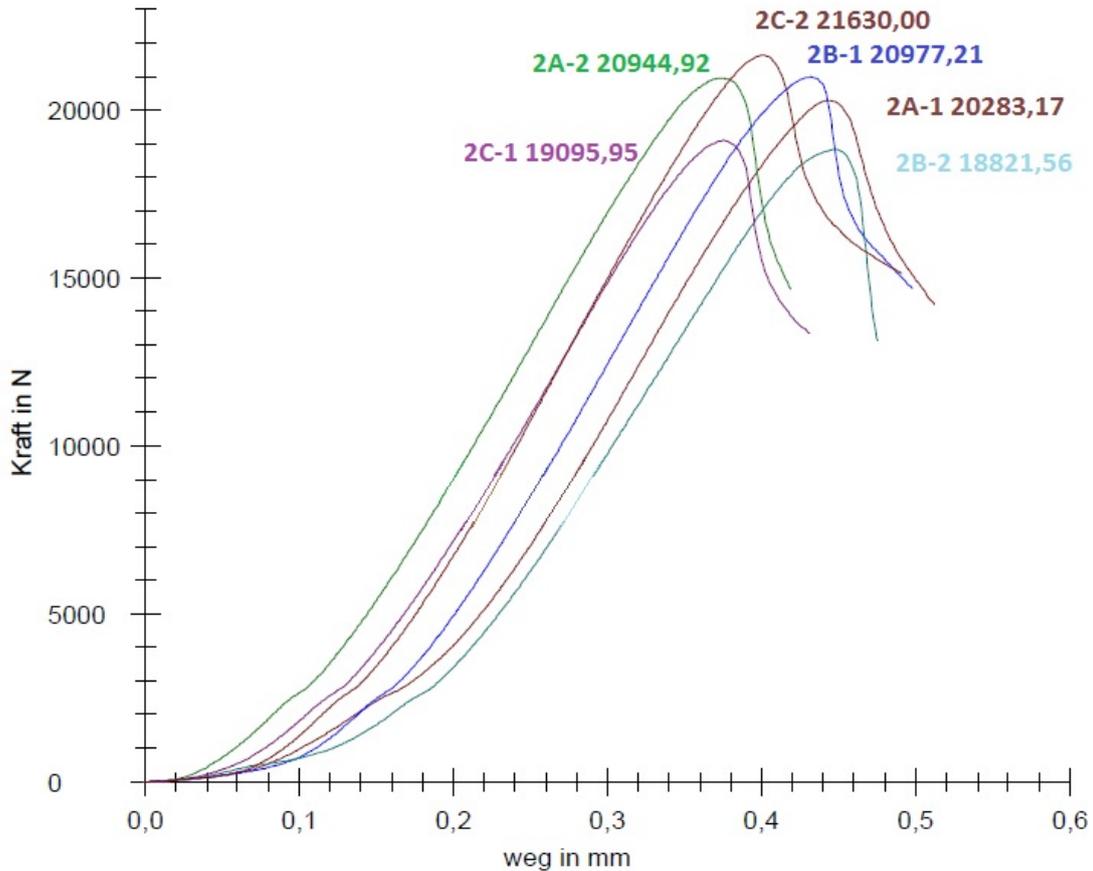


Abb. 68: Ergebnisse der zweiten Druckversuchsreihe (2A-1 bis 2C-2)

Ein fast identischer Verlauf ist auch, wie in Abb. 67 der Versuchskurven zu erkennen, welcher abermals auf eine ähnliche Betonstruktur der einzelnen Probekörper zurückzuführen ist. In Tabelle 83 sind die Ergebnisse der zweiten Druckversuchsreihe numerisch angeführt.

Tabelle 83: Ergebnisse der zweiten Druckversuchsreihe (2A-1 bis 2C-2)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
2A-1	1600	20283,17	12,68
2A-2	1600	20944,92	13,09
2B-1	1600	20977,21	13,11
2B-2	1600	18821,56	11,76
2C-1	1600	19095,95	11,93
2C-2	1600	21630,00	13,52

In der letzten Spalte der Tabelle sind die Spannungen der jeweiligen Versuche ermittelt worden. Der Versuchskörper 2C-2 ist mit 13,52 N/mm² der stabilste.

Die maximale Spannung aus der ersten Druckversuchsreihe beträgt 13,25 N/mm² (siehe Tabelle 81), bei einem Raumgewicht von 1622,37 kg/m³ (siehe Tabelle 80). Die maximale

Spannung aus der zweiten Druckversuchsreihe beträgt 13,52 N/mm² (siehe Tabelle 83), bei einem Raumgewicht von 1651,82 kg/m³ (siehe Tabelle 80). Die maximalen Spannungen sind allerdings zu niedrig, daher werden die Betonversuche fortgesetzt und es wird versucht den Beton einerseits leichter und andererseits stabiler zu machen

4.5 Versuche zur Steigerung der Betonfestigkeit - Versuchsreihe 15 bis 20

Um die Festigkeit des Betons zu steigern, aber gleichzeitig sein Raumgewicht zu verringern, mussten Veränderungen in der Betonrezeptur vorgenommen werden. In Tabelle 84 ist der Mischungsentwurf des fünfzehnten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 84: Mischungsentwurf des fünfzehnten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,52%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,68%
Wasser	388,00	1,00	388,00	22,03%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,57%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,11%
Fließmittel	2,09	1,10	1,90	0,11%
Stabilisator	0,20	1,02	0,20	0,01%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	12,92%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	26,21%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,57%
Quarzmehl	200,00	2,65	75,47	4,29%
			Summe 1761,21	100,00%

Vergleicht man die beiden Mischungsentwürfe des vierzehnten (siehe Tabelle 78) und des fünfzehnten (siehe Tabelle 84) Betonversuchs, so erkennt man, dass sich die beiden Mischungen lediglich durch die Zugabe des Quarzmehls, in der fünfzehnten Mischung, unterscheiden. Somit konnte die Auswirkung des Quarzmehls sehr schnell festgestellt werden. Man muss nur die beiden Versuchsergebnisse untereinander vergleichen.

Erwartungsgemäß konnte das Ausbreitfließmaß der fünfzehnten Mischung nicht bestimmt werden, da die Mischung viel zu steif war (siehe Abb. 69).



Abb. 69: Ausbreitkuchen des fünfzehnten Versuchs

Sechzehnter Betonversuch

In Tabelle 85 ist der Mischungsentwurf des sechzehnten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 85: Mischungsentwurf des sechzehnten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	9,34%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	6,22%
Wasser	230,00	1,00	230,00	14,31%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	9,39%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,41%
Fließmittel	6,00	1,10	5,45	0,34%
Stabilisator	0,20	1,02	0,20	0,01%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	14,16%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	28,72%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	9,39%
Quarzmehl	200,00	2,65	75,47	4,70%
			Summe 1606,76	100,00%

In der sechzehnten Mischung wurde der Quarzmehlanteil gegenüber der fünfzehnten Mischung nicht verändert. Der Fließmittelanteil wurde, aufgrund des Versuchsergebnisses der fünfzehnten Mischung, verdreifacht und der Wasseranteil ein wenig reduziert, alle anderen Bestandteile der Mischung wurden nicht verändert.

Während des Mischens konnte bereits festgestellt werden, dass sich der Mischungsentwurf nicht für die weiteren Versuche eignet, da durch die Reduzierung des Wassers der Beton zu granulieren beginnt (siehe Abb. 70).



Abb. 70: Granulierter Beton in der Mischmaschine

Siebzehnter Betonversuch

In Tabelle 86 ist der Mischungsentwurf des siebzehnten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 86: Mischungsentwurf des siebzehnten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,50%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,67%
Wasser	388,00	1,00	388,00	21,99%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,55%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,10%
Fließmittel	6,00	1,10	5,45	0,31%
Stabilisator	0,20	1,02	0,20	0,01%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	12,89%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	26,15%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,55%
Quarzmehl	200,00	2,65	75,47	4,28%
			Summe 1764,76	100,00%

In der siebzehnten Mischung wurde der Wasseranteil wieder angehoben. Er entspricht nun wieder der fünfzehnten Betonmischung. Der einzige Unterschied zwischen der siebzehnten und der fünfzehnten Betonmischung ist der Fließmittelgehalt. In Tabelle 87 ist das Ergebnis des siebzehnten Betonversuchs angeführt.

Tabelle 87: Ergebnis des siebzehnten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
900	860
$\beta_p = 76,44$	

In Tabelle 87 erkennt man, dass die beiden Ergebnisse das maximale Ausbreitmaß von 750,00 mm überschreiten und die Mischung damit zu flüssig ist. Dementsprechend ist auch der β_p -Wert mit 76,44 zu groß. In Abb. 71 ist das Ergebnis des siebenten Betonversuches dargestellt.

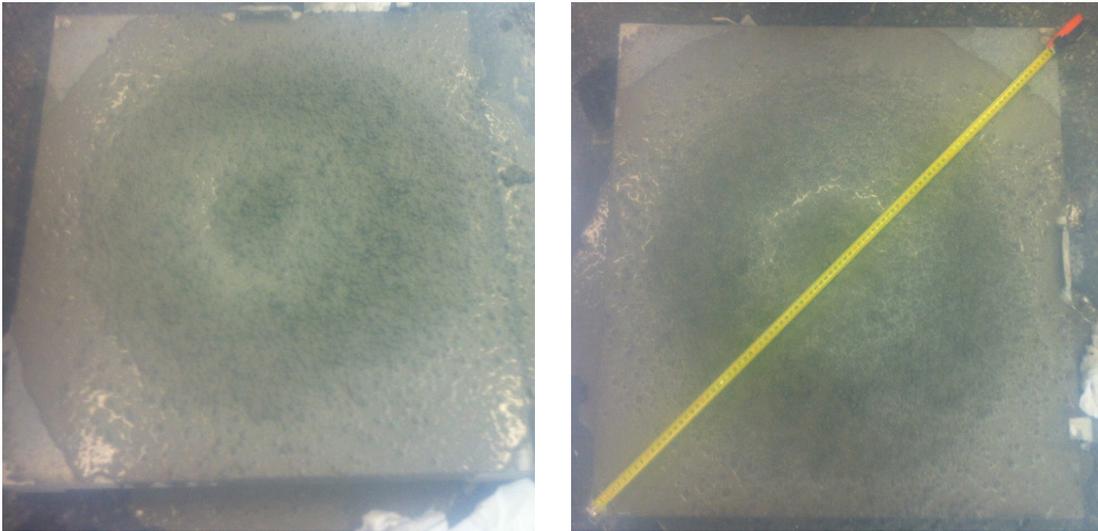


Abb. 71: Ausbreitkuchen des siebzehnten Betonversuchs

Betrachtet man die Abbildung, erkennt man, dass die Mischung entmischt und daher weitere Korrekturen an ihr vorgenommen werden müssen.

Achtzehnter Betonversuch

In Tabelle 88 ist der Mischungsentwurf des achtzehnten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 88: Mischungsentwurf des achtzehnten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,50%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,66%
Wasser	388,00	1,00	388,00	21,98%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,55%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,10%
Fließmittel	6,00	1,10	5,45	0,31%
Stabilisator	1,00	1,02	0,98	0,06%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	12,89%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	26,14%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,55%
Quarzmehl	200,00	2,65	75,47	4,27%
			Summe 1765,55	100,00%

Um der Entmischung im siebzehnten Betonversuch entgegen zu wirken wurde der Stabilisatoranteil im achtzehnten Versuch um das 5-fache erhöht. In Tabelle 89 ist das Ergebnis des achtzehnten Betonversuchs angeführt.

Tabelle 89: Ergebnis des achtzehnten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
652	624
$\beta_p = 39,70$	

Das Setzfließmaß befindet sich mit $\beta_p = 39,70$ knapp unter der β_p Grenze von 41,25. Die Mischung ist somit etwas zu steif. Das Ergebnis des achtzehnten Betonversuchs ist in Abb. 72 dargestellt.

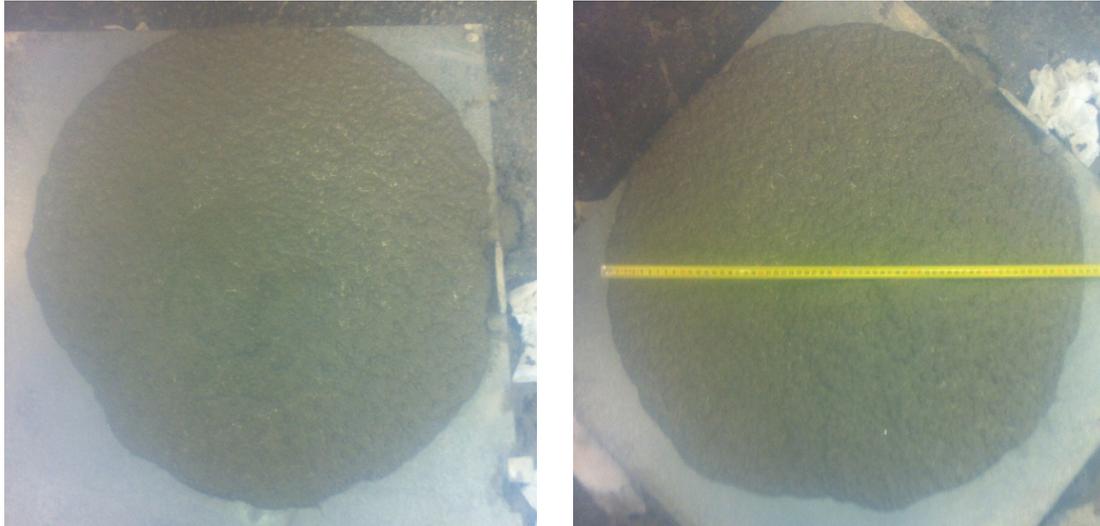


Abb. 72: Ausbreitkuchen des achtzehnten Betonversuchs

Neunzehnter Betonversuch

In Tabelle 90 ist der Mischungsentwurf des neunzehnten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 90: Mischungsentwurf des neunzehnten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,50%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,66%
Wasser	388,00	1,00	388,00	21,98%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,55%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,10%
Fließmittel	6,00	1,10	5,45	0,31%
Stabilisator	0,80	1,02	0,78	0,04%
Liapor 1-/4	91,00	0,40	227,50	12,89%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	26,14%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,55%
Quarzmehl	200,00	2,65	75,47	4,28%
			Summe 1765,35	100,00%

In der neunzehnten Betonmischung wurde lediglich der Stabilisatoranteil gesenkt, um ein größeres Setzfließmaß zu erhalten. Das Ergebnis des neunzehnten Betonversuches ist in Tabelle 91 angeführt.

Tabelle 91: Ergebnis des neunzehnten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
650	652
$\beta_p = 41,38$	

Der β p-Wert liegt zwar über der geforderten Mindestgrenze von 41,25, allerdings ist davon auszugehen, dass durch eine weitere Senkung des Stabilisatoranteiles ein besserer β p-Wert zu erzielen ist. In Abb. 73 ist das Ergebnis des neunzehnten Betonversuchs dargestellt.



Abb. 73: Ausbreitkuchen des neunzehnten Betonversuchs

Zwanzigster Betonversuch

In Tabelle 92 ist der Mischungsentwurf des zwanzigsten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 92: Mischungsentwurf des zwanzigsten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	8,50%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,67%
Wasser	388,00	1,00	388,00	21,98%
Gesteinskörnung 0/1	400,00	2,65	150,94	8,55%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	3,10%
Fließmittel	6,00	1,10	5,45	0,31%
Stabilisator	0,60	1,02	0,59	0,03%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	12,89%
Liapor 4/8	150,00	0,33	461,54	26,15%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	400,00	2,65	150,94	8,55%
Quarzmehl	200,00	2,65	75,47	4,28%
			Summe 1765,16	100,00%

Der Stabilisatoranteil wurde ein weiteres Mal gesenkt um die Betonmischung flüssiger zu machen. Das Ergebnis ist in Tabelle 93 angeführt.

Tabelle 93: Ergebnis des zwanzigsten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
705	705
$\beta_p = 48,70$	

Wie erwartet, ist die zwanzigste Mischung flüssiger als die neunzehnte. Der β_p -Wert mit 48,70 liegt in einem ausgezeichneten Bereich. Aus der zwanzigsten Betonmischung wurden Versuchskörper erstellt.

4.6 Bestimmung der Betonfestigkeit an optimierter Mischung

Es wurden, ebenso wie beim vierzehnten Betonversuch, sechs Versuchskörper hergestellt. Nach dem Ausschalen der Prüfkörper wurde als erster deren Raumgewicht bestimmt und auf 1 m³ hochgerechnet. Das Raumgewicht der jeweiligen Prüfkörper ist in Tabelle 94 angeführt.

Tabelle 94: Kubatur und Gewicht der zweiten sechs Versuchskörper

Versuchskörper	Gewicht [g]	Volumen [cm ³]	Raumgewicht [kg/m ³]
3A	427,70	265,41	1611,49
3B	420,10	264,72	1586,96
3C	472,30	263,09	1795,21
4A	382,90	259,03	1478,19
4B	477,30	261,22	1827,21
4C	485,32	259,26	1871,96

In der letzten Spalte der Tabelle sieht man, dass die Raumgewichte beider Versuchsreihen innerhalb der geforderten Grenzen für Leichtbeton liegen. Die sechs Proben wurden mittels eines Biegeversuchs und eines Druckversuchs ausgewertet. In Abb. 74 sind die Ergebnisse des Biegeversuchs der dritten Versuchsreihe dargestellt.

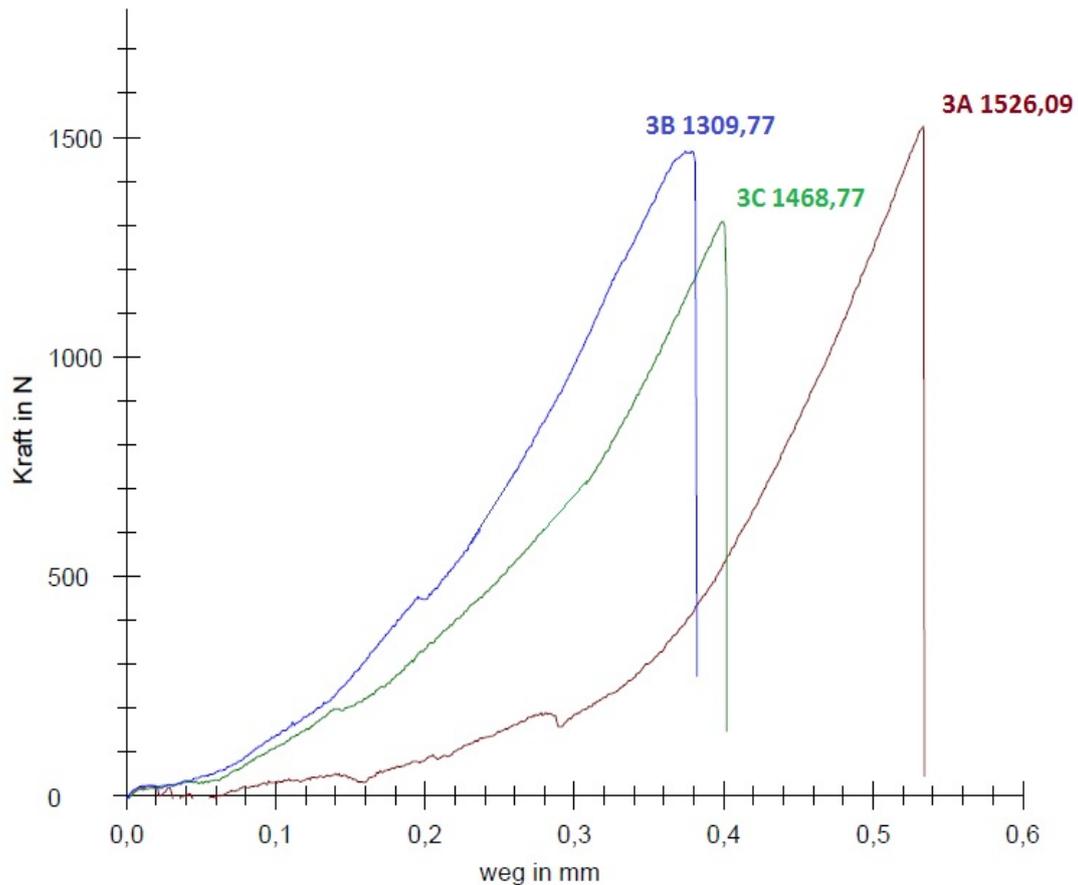


Abb. 74: Ergebnis der dritten Biegeversuchsreihe (3A bis 3C)

Die Ergebnisse des dritten Biegeversuchs sind in Tabelle 95 numerisch angeführt.

Tabelle 95: Ergebnis des dritten Biegeversuchs (3A bis 3C)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
3A	1600	1526,09	3,55
3B	1600	1309,35	3,04
3C	1600	1468,77	3,36

Da beim Biegeversuch jeder Versuchskörper in der Mitte geteilt wurde, ergeben sich insgesamt drei Versuchskörpern für den Biegeversuch und sechs Versuchskörper für den Druckversuch. Nach dem Biegeversuch wurde auch für die dritte Versuchsreihe der Druckversuch durchgeführt. In Abb. 75 sind die Ergebnisse dargestellt.

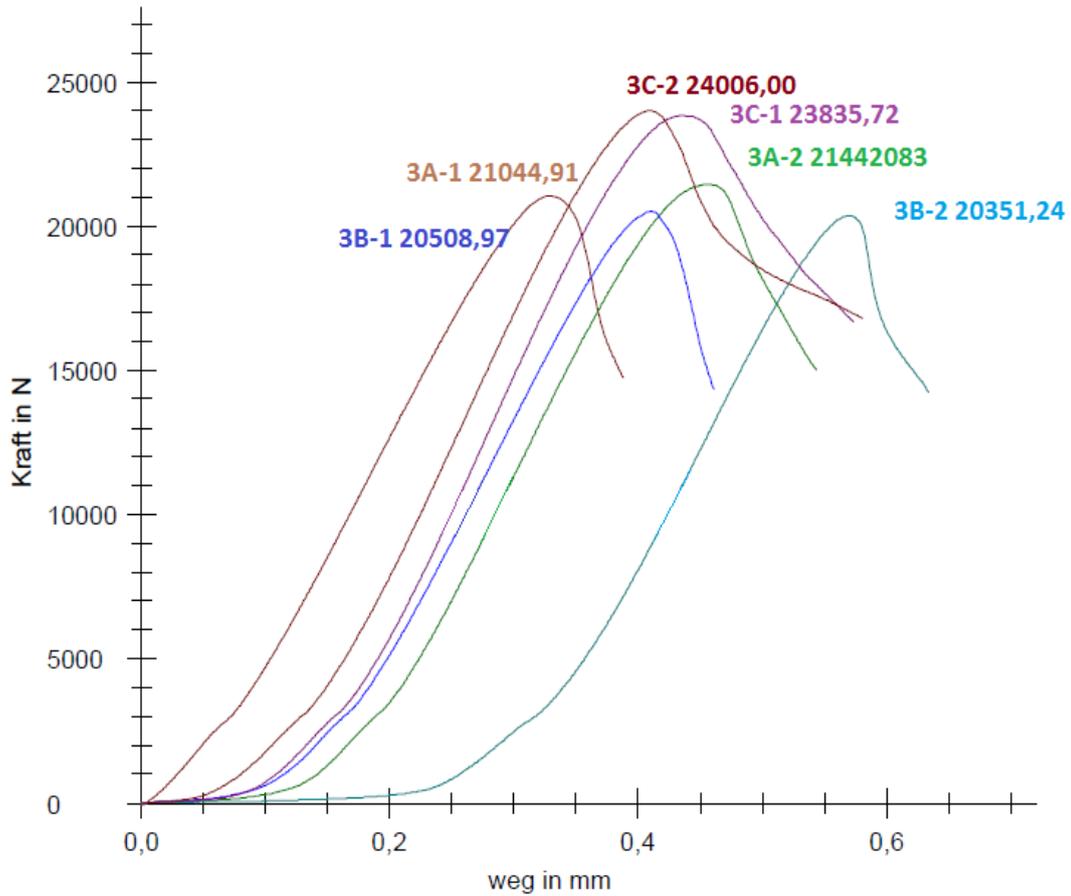


Abb. 75: Ergebnis der dritten Druckversuchsreihe (3A-1 bis 3C-2)

In Tabelle 96 sind die Ergebnisse der dritten Druckversuchsreihe numerisch angeführt.

Tabelle 96: Ergebnis der dritten Druckversuchsreihe (3A-1 bis 3C-2)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
3A-1	1600	21044,91	12,76
3A-2	1600	21442,83	12,98
3B-1	1600	20508,97	12,41
3B-2	1600	20351,24	12,32
3C-1	1600	23835,72	14,53
3C-2	1600	24006,00	14,64

In der letzten Spalte der Tabelle sind die Spannungen der jeweiligen Versuche ermittelt worden. Der Versuchskörper 3C-2 ist mit 14,64 N/mm² der Stabilste. In Abb. 76 sind alle Querschnitte der Versuchskörper abgebildet.

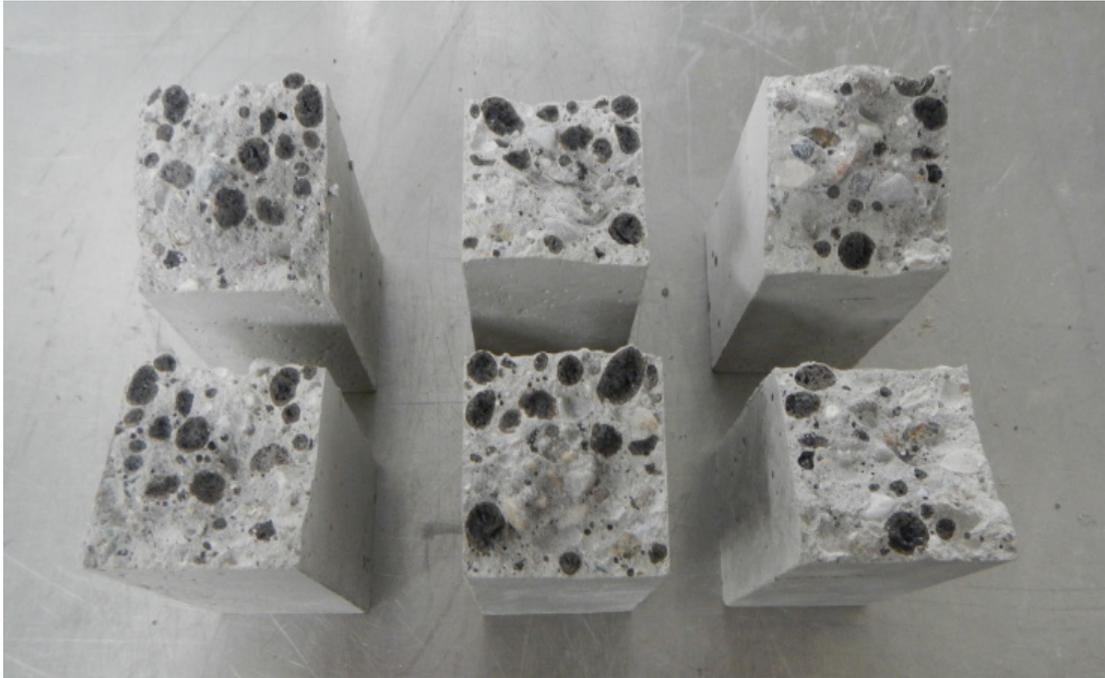


Abb. 76: Querschnitte der Versuchskörper 3A bis 3C (von links nach rechts)

Der Biegeversuch der vierten Versuchsreihe ist in Abb. 77 dargestellt.

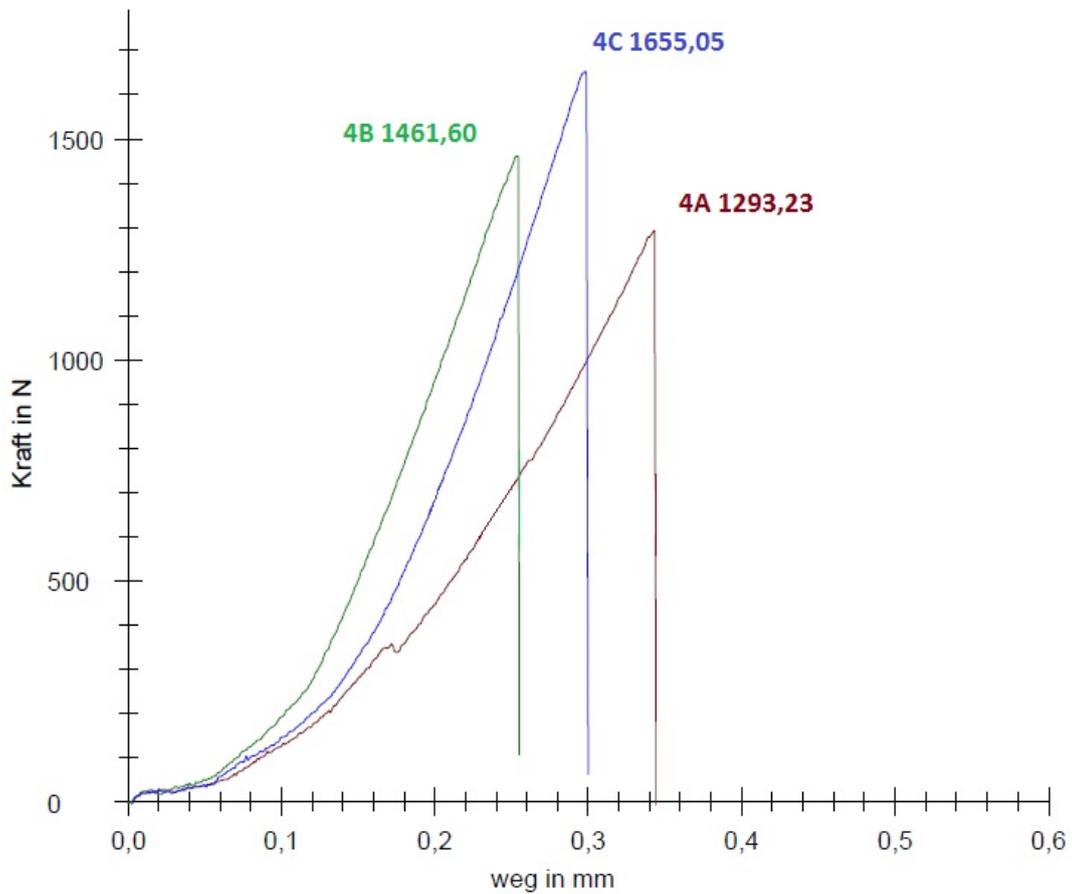


Abb. 77: Ergebnis des vierten Biegeversuchs (4A bis 4C)

Die Ergebnisse des vierten Biegeversuchs sind in Tabelle 97 numerisch angeführt.

Tabelle 97: Ergebnis des vierten Biegeversuchs (4A bis 4C)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
4A	1600	1293,23	2,99
4B	1600	1461,60	3,35
4C	1600	1655,05	4,83

Nach dem Biegeversuch wurde auch für die vierte Versuchsreihe der Druckversuch durchgeführt. In Abb. 78 sind diese Ergebnisse dargestellt.

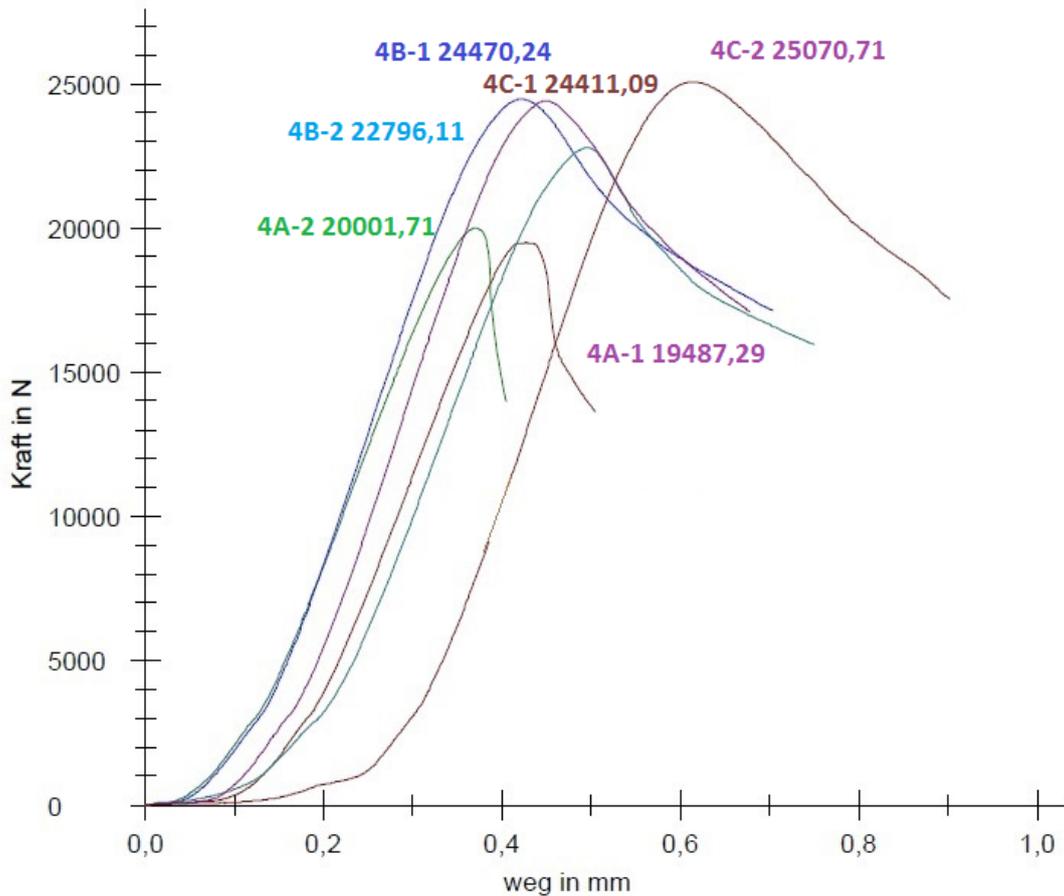


Abb. 78: Ergebnis der vierten Druckversuchsreihe (4A-1 bis 4C-2)

In Tabelle 98 sind die Ergebnisse der vierten Druckversuchsreihe numerisch angeführt.

Tabelle 98: Ergebnis der vierten Druckversuchsreihe (4A-1 bis 4C-2)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
4A-1	1600	19487,29	12,11
4A-2	1600	20001,71	12,43
4B-1	1600	24470,24	15,05
4B-2	1600	22796,11	14,02
4C-1	1600	24411,09	15,17
4C-2	1600	25070,71	15,58

In der letzten Spalte der Tabelle sind die Spannungen der jeweiligen Versuche angegeben. Der Versuchskörper 4C-2 ist mit 15,58 N/mm² der Stabilste. Die maximale Spannung aus der dritten Druckversuchsreihe beträgt 14,64 N/mm² (siehe Tabelle 96), bei einem Raumgewicht von 1795,21 kg/m³ (siehe Tabelle 94). Die maximale Spannung aus der vierten Druckversuchsreihe beträgt 15,58 N/mm² (siehe Tabelle 98), bei einem Raumgewicht von 1871,96 kg/m³ (siehe Tabelle 94).

Vergleicht man die Ergebnisse der ersten vier Versuchsreihen, so stellt man fest, dass durch die Zugabe des Quarzmehles, in der dritten und vierten Versuchsreihe, zwar eine Festigkeitssteigerung ermöglicht wurde, aber mit einhergehend auch eine Gewichtszunahme auftrat. Die Betone sind, nach Definition, noch immer Leichtbetone, allerdings liegen Sie mit ca. 1800 kg/m³ schon fast im Bereich des Normalbetons. Dies führte dazu den Mischungsentwurf ein weiteres Mal dahingehend zu bearbeiten, dass die Festigkeit des Betons erhalten bleibt und das Gewicht verringert wird.

4.7 Betonversuch zur Reduzierung der Dichte - Versuchsreihe 21

In Tabelle 99 ist der Mischungsentwurf des einundzwanzigsten Betonversuchs gegeben.

Tabelle 99: Mischungsentwurf des einundzwanzigsten Betonversuchs

	Zusammensetzung [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]	Volumen [in %]
Zement	465,00	3,10	150,00	7,51%
Flugasche	240,00	2,40	100,00	5,01%
Wasser	388,00	1,00	388,00	19,43%
Gesteinskörnung 0/1	300,00	2,65	113,21	5,67%
Gesteinskörnung 1/4	145,00	2,65	54,72	2,74%
Fließmittel	6,00	1,10	5,45	0,27%
Stabilisator	0,60	1,02	0,59	0,03%
Liapor 1/4	91,00	0,40	227,50	11,39%
Liapor 4/8	250,00	0,33	769,23	38,51%
Liapor 8/16	0,00	0,33	0,00	0,00%
Gesteinskörnung 4/8	300,00	2,65	113,21	5,67%
Quarzmehl	200,00	2,65	75,47	3,78%
			Summe 1997,38	100,00%

Vergleicht man die beiden letzten Mischungsentwürfe, stellt man fest, dass die Gesteinskörnung 0/1 und 4/8 jeweils um 100 kg/m³ reduziert wurde. Des Weiteren wurde das Liapor Granulat mit der Stärke 4/8 um 100 kg/m³ erhöht. Aufgrund der Annahme dass das Granulat zu einer weniger fließfähigen Suspension führt, wurde der Mischungsentwurf ein zweites Mal durchgeführt, wobei hier der Fließmittelanteil um 1 kg/m³ erhöht wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 100 und Tabelle 101 angeführt.

Tabelle 100: Ergebnis des einundzwanzigsten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
670	675
$\beta_p = 44,23$	

Tabelle 101: Ergebnis des zweiundzwanzigsten Betonversuchs

Setzfließmaß [mm]	
x- Richtung	y- Richtung
745	748
$\beta_p = 54,73$	

Der β_p -Wert liegt mit 54,73 an der oberen Grenze des Setzfließmaßes ($\beta_p = 55,25$). Dennoch wurde die Mischung zur Herstellung von weiteren sechs Versuchskörpern verwendet.

4.8 Bestimmung der Betonfestigkeit an Dichteoptimierter SVLB-Proben

Nach dem Ausschalen der Prüfkörper wurde als erster deren Raumgewicht bestimmt und auf 1 m³ hochgerechnet. Das Raumgewicht der jeweiligen Prüfkörper ist in Tabelle 102 angeführt.

Tabelle 102: Kubatur und Gewicht der dritten sechs Versuchskörper

Versuchskörper	Gewicht [g]	Volumen [cm ³]	Raumgewicht [kg/m ³]
5A	393,50	266,85	1474,59
5B	367,90	255,97	1437,30
5C	412,00	260,84	1579,49
6A	419,90	263,30	1594,79
6B	464,40	270,53	1716,64
6C	453,30	270,86	1673,58

In der letzten Spalte der Tabelle sieht man, dass die Raumgewichte beider Versuchsreihen innerhalb der geforderten Grenzen für Leichtbeton liegen. Die sechs Proben wurden mittels eines Biegeversuchs und eines Druckversuchs ausgewertet. In Abb. 79 sind die Ergebnisse des Biegeversuchs der fünften Versuchsreihe dargestellt.

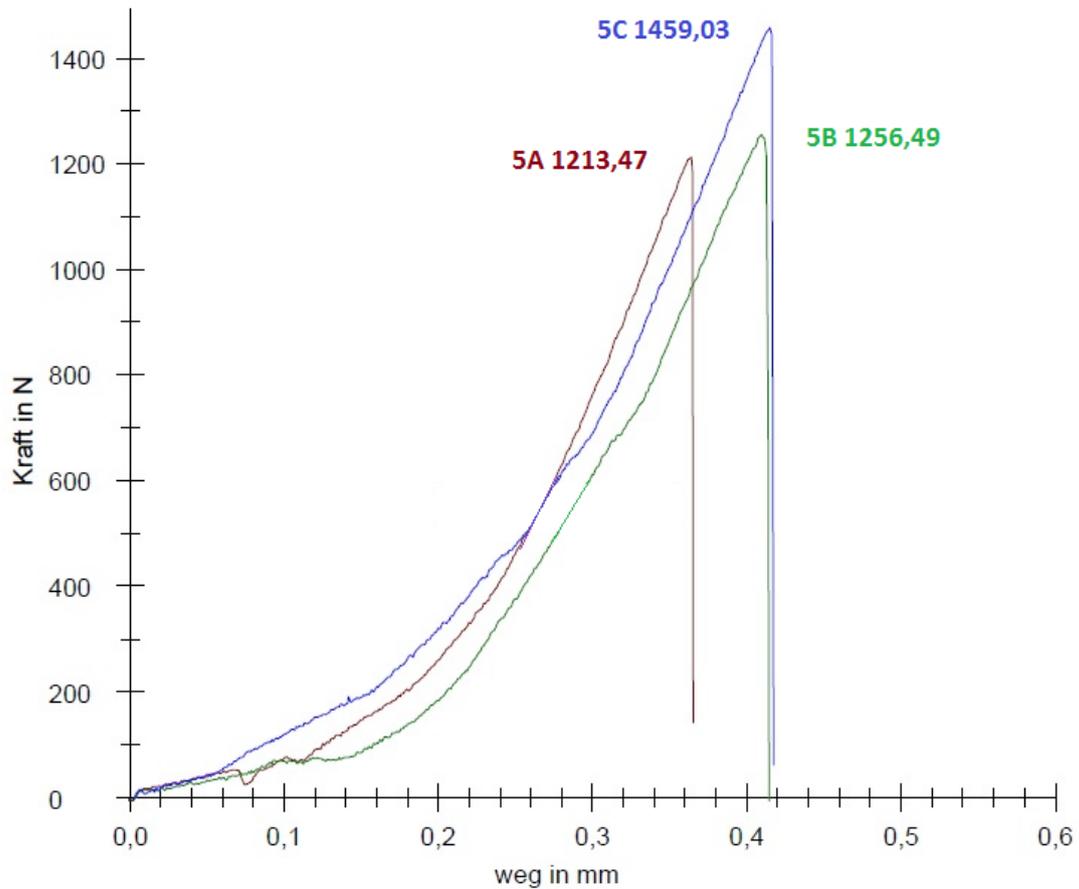


Abb. 79: Ergebnis des fünften Biegeversuchs (5A bis 5C)

Die Ergebnisse des fünften Biegeversuchs sind in Tabelle 103 numerisch angeführt.

Tabelle 103: Ergebnis des fünften Biegeversuchs (5A bis 5C)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
5A	1600	1213,47	2,73
5B	1600	1256,49	2,93
5C	1600	1459,03	3,33

Nach dem Biegeversuch wurde auch für die fünfte Versuchsreihe der Druckversuch durchgeführt. In Abb.80 sind diese Ergebnisse dargestellt.

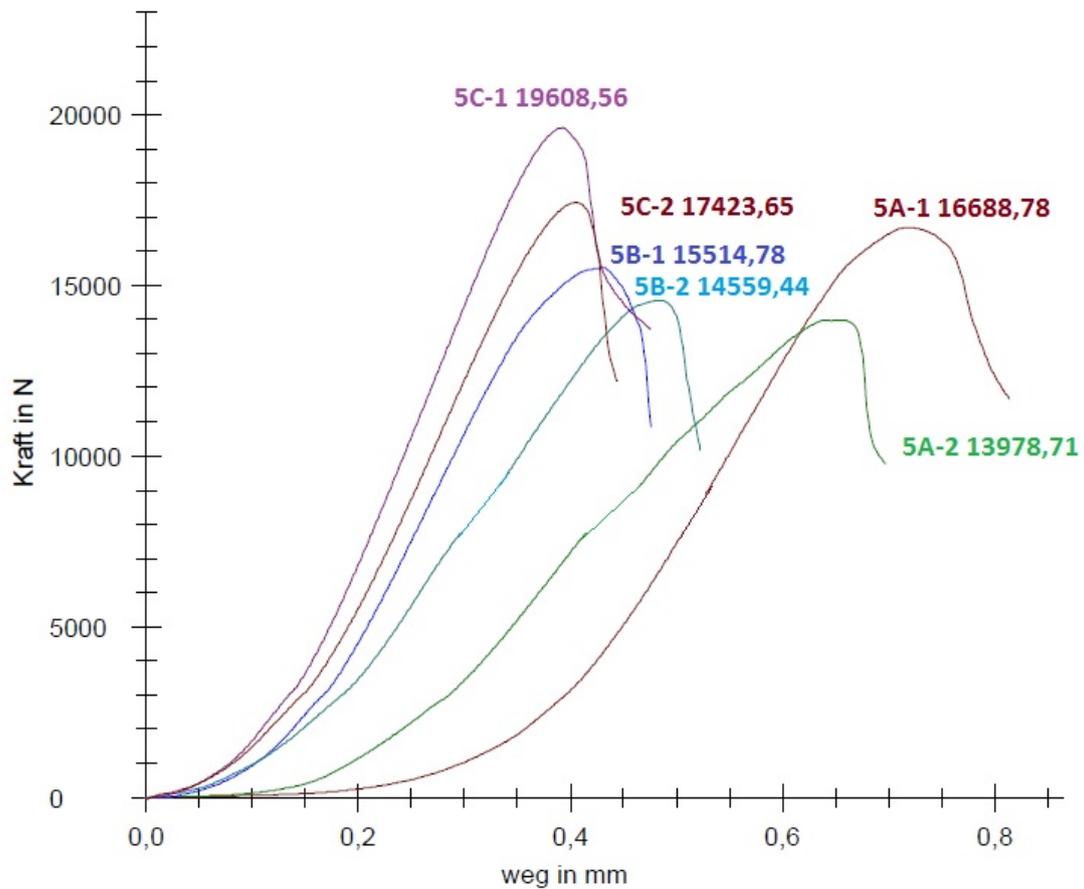


Abb.80: Ergebnis der fünften Druckversuchsreihe (5A-1 bis 5C-2)

In Tabelle 104 sind die Ergebnisse der fünften Druckversuchsreihe numerisch angeführt.

Tabelle 104: Ergebnis der fünften Druckversuchsreihe (5A-1 bis 5C-2)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
5A-1	1600	16688,78	10,10
5A-2	1600	13978,71	8,46
5B-1	1600	15514,78	9,74
5B-2	1600	14559,44	9,14
5C-1	1600	19608,56	12,06
5C-2	1600	17423,65	10,72

In der letzten Spalte der Tabelle sind die Spannungen der jeweiligen Versuche angeführt. Der Versuchskörper 5C-1 ist mit 14,64 N/mm² der Stabilste. In Abb. 81 sind alle Querschnitte der Versuchskörper abgebildet.



Abb. 81: Querschnitte der Versuchskörper 5A bis 5C (von links nach rechts)

Der Biegeversuch der sechsten Versuchsreihe ist in Abb. 82 dargestellt.

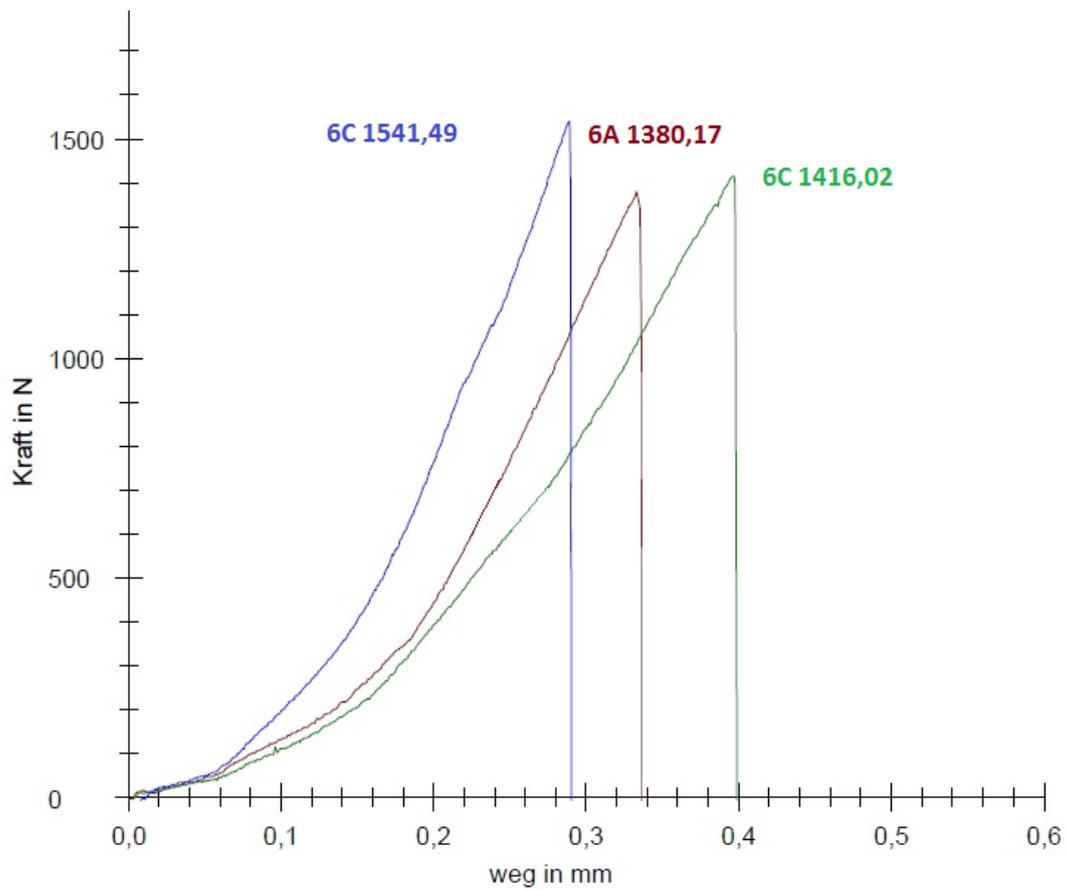


Abb. 82: Ergebnis des sechsten Biegeversuchs (6A bis 6C)

Die Ergebnisse des sechsten Biegeversuchs sind in Tabelle 105 numerisch angegeben.

Tabelle 105: Ergebnis des sechsten Biegeversuchs (5A bis 5C)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
6A	1600	1380,17	3,17
6B	1600	1416,02	3,18
6C	1600	1541,49	3,44

Nach dem Biegeversuch wurde auch für die sechste Versuchsreihe der Druckversuch durchgeführt. In Abb. 83 sind diese Ergebnisse dargestellt.

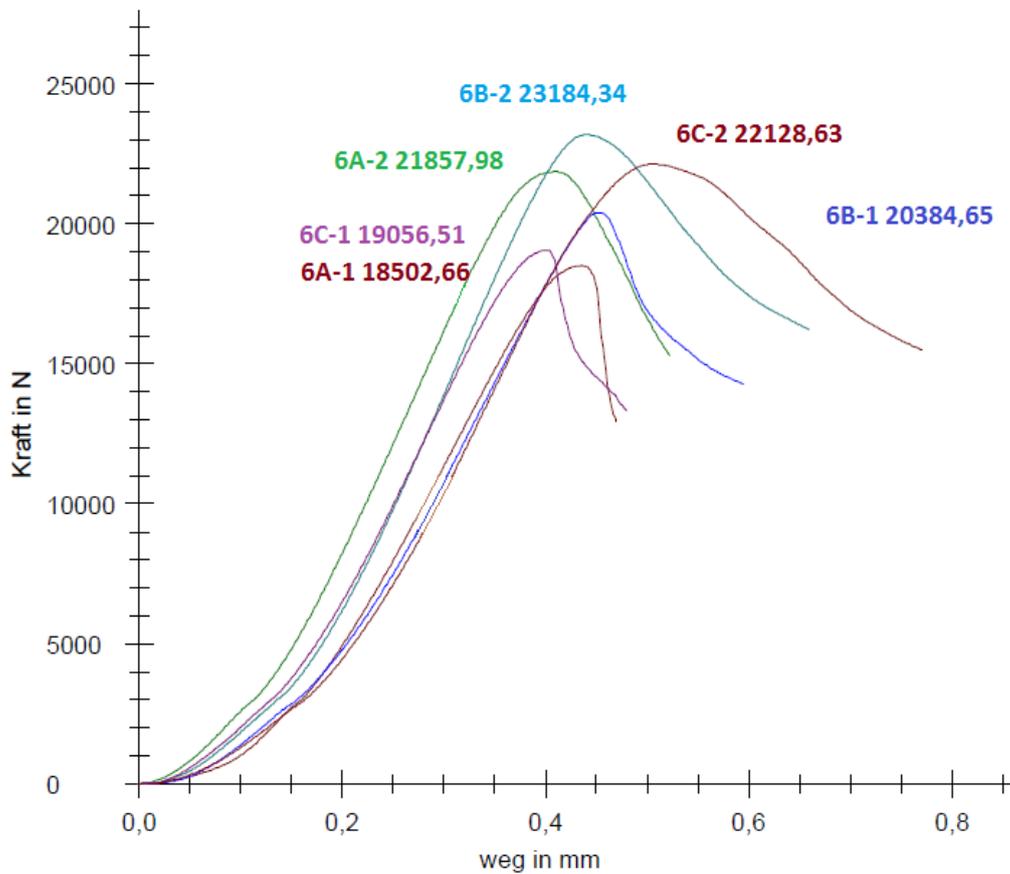


Abb. 83: Ergebnis der sechsten Druckversuchsreihe (6A-1 bis 6C-2)

In Tabelle 106 sind die Ergebnisse der sechsten Druckversuchsreihe numerisch angeführt.

Tabelle 106: Ergebnis der sechsten Druckversuchsreihe (6A-1 bis 6C-2)

Versuchskörper	A [mm ²]	Fmax [N]	σ [N/mm ²]
6A-1	1600	18502,66	11,41
6A-2	1600	21857,98	13,48
6B-1	1600	20384,65	12,25
6B-2	1600	23184,34	13,93
6C-1	1600	19056,51	11,44
6C-2	1600	22128,63	13,28

In der letzten Spalte der Tabelle sind die Spannungen der jeweiligen Versuche ermittelt worden. Der Versuchskörper 6B-2 ist mit $13,93 \text{ N/mm}^2$ der Stabilste. Die maximale Spannung aus der fünften Druckversuchsreihe beträgt $12,06 \text{ N/mm}^2$ (siehe Tabelle 104), bei einem Raumgewicht von $1579,49 \text{ kg/m}^3$ (siehe Tabelle 102). Die maximale Spannung aus der sechsten Druckversuchsreihe beträgt $13,93 \text{ N/mm}^2$ (siehe Tabelle 106), bei einem Raumgewicht von $1673,58 \text{ kg/m}^3$ (siehe Tabelle 102).

Vergleicht man die Ergebnisse der vierten Versuchsreihe mit denen der fünften und sechsten Versuchsreihe, stellt man fest dass das Raumgewicht verringert wurde, was allerdings eine Verringerung der Festigkeit bedeutet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde, ausgehend von zwei bereits sehr gut erforschten Betonarten (selbstverdichtender Beton und Leichtbeton) ein selbstverdichtender Leichtbeton entwickelt. In den ersten beiden Kapiteln wurden die geschichtliche und technologische Entwicklung der beiden bekannten Betone bearbeitet. Ebenso wurden in den ersten beiden Kapiteln angeführt, welchen Versuchen zur Charakterisierung durchgeführt werden. Um einen SVLB zu entwickeln, muss man, beginnend mit der Leimphase über die Mörtelphase bis hin zur Betonphase alle Entwicklungsschritte nacheinander absolvieren um einen brauchbaren bzw. gebrauchstauglichen selbstverdichtenden Beton zu erhalten (siehe Abb.28). Die Versuche wurden immer aufeinander aufbauend durchgeführt, bzw. nach Bedarf modifiziert, wodurch eine schnelle Optimierung, in den verschiedenen Versuchsphasen, möglich war (siehe Tabelle 107; Tabelle 108; Tabelle 109)

Tabelle 107: Zusammenfassung der Leimversuche

Leimversuche				
Versuchs - nummer	Ziel	Betontechnologische Maßnahmen	Ergebnis	Setzfließmaß [1 bis 4]
1	Bestimmung des Wassergehalts nach Okamura	Grundentwurf	zu steif	0,11 bis 1,62
2		Erhöhung des Kalkmehlanteils	zu steif	0,17 bis 1,92
3		Erhöhung des Kalkmehlanteils	zu steif	0,17 bis 1,96
4		Erhöhung des Kalkmehlanteils	zu steif	0,18 bis 1,99
Kalkmehl durch Flugasche ersetzt				
5	Bestimmung des Wassergehalts nach Okamura	Grundentwurf	zu flüssig	1,53 bis 6,32
6		Erhöhung des Flugascheanteils	zu steif/ zu flüssig	0,97 bis 4,78
7	Bestimmung des Wassergehalts nach der W/B Methode	Grundentwurf	zu steif	0,73 bis 3,12
8		Erhöhung des W/B-Wertes	zu flüssig	1,81 bis 4,24
9		Reduzierung des W/B-Wertes	ideal	1,91 bis 3,62
10		Wiederholung Versuch 9	ideal	2,05 bis 3,69
11		Wiederholung Versuch 9	ideal	2,06 bis 3,77

Tabelle 108: Zusammenfassung der Mörtelversuche

Mörtelversuche				
Versuchs - nummer	Ziel	Betontechnologische Maßnahmen	Ergebnis	Ausbreitfließmaß [5]
1	Ausbreitdurchmesser nach Okamura	Grundentwurf; ohne Fließmittel	zu steif	nicht gemessen
2		Zugabe von Fließmittel	zu flüssig	8,92
3		Reduzierung des Fließmittels	zu steif	3,41
4		Erhöhung des Fließmittels	zu flüssig	6,4
5		Reduzierung des Fließmittels	zu steif	4,11
6		Erhöhung des Fließmittels	zu steif	4,34
7		Erhöhung des Fließmittels	ideal	5,05
Liapor Granulat beigemischt				
8	Ausbreitdurchmesser nach Okamura	Grundentwurf	zu flüssig	8,52
9		Reduzierung des Fließmittels	zu flüssig	7,73
10		Reduzierung des Fließmittels	zu steif	4,64
11		Erhöhung des Fließmittels	ideal	5,05
Kontrolle der Auslaufzeit des Mörtels (siehe Kapitel 4.2.4)				
Aufschwimmkontrolle des Granulates (siehe Kapitel 4.2.5)				

Tabelle 109: Zusammenfassung der Betonversuche

Betonversuche				
Versuchs - nummer	Ziel	Betontechnologische Maßnahmen	Ergebnis	Setzfließmaß [41,25 bis 55,25]
1	Setzfließmaß nach Okamura	Grundentwurf	zu steif	nicht gemessen
2		Verringerung des Granulates	zu steif	nicht gemessen
3		Erhöhung des Wassergehaltes	zu steif	nicht gemessen
4		Weglassen des Granulates 8/16	zu steif	nicht gemessen
5		Erhöhung des Wassergehaltes	zu steif	nicht gemessen
6		Erhöhung des Wassergehaltes	zu steif	18,76
7		Erhöhung des Wassergehaltes	zu flüssig/entmischt	65,42
8		Erhöhung feiner Gesteinskörnung	zu flüssig/entmischt	nicht gemessen
9		Wassergehalt laut Mörtelversuch; Reduzierung der Gesteinskörnung 4/8	zu steif	11,15
10		Erhöhung des Wassergehaltes	ideal	48,77
Kontrollmischungen des 10 Versuchs durchgeführt, Setzfließmaße sind 21,80 und 22,96 --> zu steif				
11	Setzfließmaß nach Okamura	Erhöhung des Wassergehaltes	ideal/entmischt	48,07
12		Zugabe eines Stabilisators	zu steif	25,94
13		Reduzierung des Stabilisators	zu steif	28,76
14		Reduzierung des Stabilisators	ideal	41,58

Bestimmung der Betonfestigkeit (siehe Kapitel 4.4)				
15	Setzfließmaß nach Okamura	Zugabe von Quarzmehl zur Festigkeitssteigerung	zu steif	nicht gemessen
16		Erhöhung des Fließmittels; Reduzierung des Wassergehaltes	Suspension granuliert	nicht gemessen
17				
18		Erhöhung des Stabilisators	zu steif	39,7
19		Reduzierung des Stabilisators	ideal	41,38
20		Reduzierung des Stabilisators	ideal	48,7
Bestimmung der Betonfestigkeit (siehe Kapitel 4.6)				
21	Setzfließmaß nach Okamura	Erhöhung des Granulatanteils zur Reduzierung der Dichte	ideal	54,73

Im Laufe der Versuchsdurchführung wurde allerdings bald festgestellt, dass dieses Schema mit den geplanten Ausgangsstoffen nicht vollständig erreicht werden konnte, es wurde daher nach Modifizierung ein eigenes Durchführungsschema entwickelt. Bei der Entwicklung des Zementleimes konnte festgestellt werden, dass nicht jeder Zuschlagstoff für einen selbstverdichtenden Beton geeignet ist. So eignet sich z.B. der Zuschlagstoff Flugasche besser als Kalkmehl. Nach Beendigung der Leimversuche wurden, aufbauend auf diese, die Mörtelversuche durchgeführt. Nach diesen wurde mit den Betonversuchen begonnen wurde. Die größte Herausforderung war es, das Granulat, welches für die Gewichtsersparnis verantwortlich ist, im Beton gleichmäßig zu verteilen und am Auftrieb zu hindern. Durch die Einhaltung der Versuchsgrenzen nach *Okamura*, für die Entwicklung eines Leichtbetons und eines selbstverdichtenden Betons, konnte auch für einen selbstverdichtenden Leichtbeton eine gebrauchstaugliche Rezeptur gefunden werden. Ausschlaggebend für die stetige Optimierung war die genaue Berechnung der Inhaltsstoffe. In dem vierten Kapitel sind die Versuche chronologisch angeführt. Die Versuche des fertigen Betons ergaben eine maximale Festigkeit von 15,58 N/mm² bei einem Gewicht von 1871,96 kg/m³.

Mit dieser Arbeit wurde ein Schritt zur Entwicklung eines selbstverdichtenden Leichtbetons gemacht. Obwohl der Schwerpunkt der Forschungsarbeit bei der Optimierung der Fließfähigkeit angesetzt wurde, könnte eine tendenzielle Steigerung der Festigkeit bereits durch die teilweise angeführte Reduktion der groben Bestandteile erreicht werden. Für eine weitere praxisbezogene angestrebte Festigkeitssteigerung (Zielsetzung C 30/33), wäre es interessant alle Bestandteile, mit einem Durchmesser größer als 1mm, aus der Mischung zu entfernen. Dadurch würde die Mischung kompakter werden. Dies hätte allerdings auch eine Gewichtszunahme zur Folge. Gegen diese könnte aber der Anteil des Granulates erhöht werden. Eine zukünftige Arbeit könnte sich mit der Problematik beschäftigen, wie sich der

fertige Beton über eine Höhendifferenz von mehreren Metern befördern lässt. Da man davon ausgehen muss, dass bei hohem Druck, welcher beim Pumpen entsteht, das Wasser der Mischung in das poröse Granulat gedrückt wird.

6 Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.lafarge.at/zement/service/ratgeber/anwendungen/spezialbetone-leichtbeton/> (letzter Zugriff 17.10.2012)
- [2] Diplomarbeit, Reinhard Schöllner (Entwurf eines hochfesten Leichtbetons mit optimaler Wärmedämmung,
- [3] <http://www.unibw.de/> (letzter Zugriff 27.08.2013)
- [4] <http://www.beton.org/bauherreninformationen/was-ist-beton/geschichte-des-betons.html>
- [5] Thorsten Faust, Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau, 2002
- [6] König, Holschemacher, Dehn, Selbstverdichtender Beton, 2001
- [7] <http://www.google.at>
- [8] Wolfgang Brameshuber, Selbstverdichtender Beton, 2003
- [9] <http://www.basf-cc.at> (letzter Zugriff 17.10.2012)
- [10] Hrsg. U. Schneider, Festbeton 14. Auflage
- [11] DIN EN 1520
- [12] <http://birgithencke.wordpress.com> (letzter Zugriff 25.07.2013)
- [13] <http://bau.fh-potsdam.de>
- [14] <http://www.sintef.no> (letzter Zugriff 09.08.2013)
- [15] Weigler, H.; Karl, S.: Stahlleichtbeton. Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin
- [16] Grübl, P.: Modell zur quantitativen Beschreibung der Bruchvorgänge in gefügedichten Leichtbeton unter Kurzzeitbelastung.
- [17] <http://www.steag-powerminerals.com> (letzter Zugriff 13.08. 2013)
- [18] SCC – SVB selbstverdichtender Beton pannenfrei, Ing. Strobel Thomas
- [19] <http://www.aktuelle-wochenschau.de> (letzter Zugriff 14.08. 2013)
- [20] Weigler, H und Karl, s., Stahlleichtbeton – Herstellung, Anwendung, Ausführung, 1972
- [21] Thienel, K-Ch.: Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton
- [22] <http://www.emi.fraunhofer.de> (letzter Zugriff 28.08.2013)
- [23] <http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp> (letzter Zugriff 18.09.2013)
- [24] <http://www.mapei.com/> (letzter Zugriff 19.09.2013)
- [25] <http://www.beton.org> (letzter Zugriff 07.10.2013)
- [26] Dipl.- Ing Michael Haist www.schleibinger.com (letzter Zugriff 31.10.2013)

7 Abbildungsverzeichnis

Abb.1: links Honig beim fließen [12], rechts Gegenüberstellung von Honig und SVB Beton [9]	11
Abb.2:Vergleich der Zusammensetzung eines konventionellen Rüttelbetons und eines SVB (W: Wasser; B: Bindemittel; Z:Zement; S:Sand; G: grobe Gesteinskörnung) [3]	12
Abb.3: Sieblinie nach Fuller [7]	13
Abb.4: Einfluss von Zugabewasser und Fließmittel auf die rheologischen Eigenschaften von Zement- bzw. Mehlkornsuspension [3]	14
Abb.5:Mischungsentwurf nach Okamura [3]	16
Abb.6: links Hägermann Konus; rechts saubere, glatte und mattfeuchte Oberfläche	17
Abb.7: links: Austritt des Leims oder Mörtels; rechts: Messung des Durchmessers	18
Abb.8: Skizze Konus nach <i>Hägermann</i> und Ausbreitfläche [6]	18
Abb.9: Trichterauslaufzeit- Versuch für Mörtel [3]	19
Abb.10: Setztrichter zur Bestimmung des Setzfließmaßes [3]	20
Abb.11:U Kasten für Betonversuch [24]	21
Abb.12: links Abmessungen L Kasten [6] ; rechts Foto L Kasten [13]	22
Abb.13: links Blockring mit Trichter [13]; rechts Blockring mit ausgeflossenem Beton [13]	22
Abb. 14: Kolosseum (recht), Pantheon (links) [7]	23
Abb.15: Beispiele von Anwendungen von Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau, von links oben nach rechts unten: Park Plaza Hotel, Southwestern Bell Telephone Company, BMW Verwaltungsgebäude, Skiflugschanze in Oberstdorf [7]	24
Abb. 16: Festigkeit und Rohdichtebereiche von Beton [21]	26
Abb. 17 : Gefüge von Normalbeton [22] (links) und konstruktiver Leichtbeton [3] (rechts)	26
Abb. 18: Kornrohdichten leichter und normaler Gesteinskörnungen [5]	27
Abb. 19: Zusammenhang zwischen Würfeldruckfestigkeit und Beton-Trockenrohddichte am Beispiel von Leichtbeton mit Blähton [3]	27
Abb.20: Leichtbeton mit matrixporigem Gefüge [5]	28
Abb.21: Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge [5]	28
Abb. 22: Leichtbetonfestigkeit in Abhängigkeit von der Matrixdruckfestigkeit [16]	29
Abb.23: Würfeldruckfestigkeit des Leichtbetons [5]	30
Abb.24: Kornzugfestigkeit der Leichtzuschläge [5]	30
Abb.25: E-Modul und Kornrohddichte verschiedener dichter Zuschläge [5]	30
Abb.26: Spektrum der Kornrohddichte / Schüttdichten verschiedener Zuschläge [5]	31
Abb. 27: Typische Leichtzuschläge von außen (jeweils links) und im Schnitt (jeweils rechts) [5]	35
Abb.28: Konzept der Vorgehensweise bei der Entwicklung von einem selbstverdichtenden Leichtbetonen [26]	36
Abb. 29: Liapor Granulat von links nach rechts; 1/4, 4/8 und 8/16	38
Abb. 30: Scherwiderstand eines Kornhaufwerks in Abhängigkeit vom Wassergehalt beim Übergang in eine Suspension [5]	40
Abb. 31: Ausbreitkuchen der ersten vier Versuche der ersten Versuchsreihe	42
Abb. 32: Auswertung der ersten vier Versuchsreihen für das Volumenverhältnis von W/B = 1,1	45
Abb. 33: Auswertung der ersten vier Versuchsreihen für das Volumenverhältnis von W/B = 1,2	45
Abb. 34: Auswertung der ersten vier Versuchsreihen für das Volumenverhältnis von W/B = 1,3	46

Abb. 35: Auswertung der ersten vier Versuchsreihen für das Volumenverhältnis von W/B = 1,4	46
Abb.36: Ausbreitmaß Flugasche und Kalkmehl	47
Abb. 37: Ermittlung des Wasseranspruches für die neunte Versuchsreihe	52
Abb. 38: Entwicklung des Setzfließmaßes in Abhängigkeit des W/B-Wertes	53
Abb. 39: Grafische Darstellung des Ausbreitmaßes für Versuchsreihe 9 bis 11.....	54
Abb. 40: Mittelwert des relativen Setzfließmaßes aus den Versuchsreihen 9 bis 11	55
Abb. 41: relatives Setzfließmaß in Abhängigkeit von dem Wassergehalt.....	55
Abb. 42: Ausbreitmaß der idealen Leimmischung.....	56
Abb. 43: Ausbreitkuchen des ersten Mörtelversuches	58
Abb. 44: Ausbreitkuchen des zweiten Mörtelversuches	60
Abb. 45: Ausbreitkuchen des dritten Mörtelversuchs	61
Abb. 46: Ausbreitkuchen des vierten Mörtelversuchs	62
Abb. 47: Ausbreitkuchen des fünften Mörtelversuchs	63
Abb. 48: Ausbreitkuchen des sechsten Mörtelversuchs.....	64
Abb. 49: Ausbreitkuchen des siebenten Mörtelversuchs.....	65
Abb. 50: Ausbreitkuchen des achten Mörtelversuches	67
Abb. 51: Ausbreitkuchen des neunten Mörtelversuchs	68
Abb. 52: Ausbreitkuchen des zehnten Mörtelversuchs	69
Abb. 53: Ausbreitkuchen des elften Mörtelversuchs	70
Abb. 54: Plastikrohr welches mit der Mörtelsuspension befüllt wurde	71
Abb. 55: Querschnitt der Versuchsrohre.....	72
Abb. 56: einzelne Querschnittsflächen des Versuchsrohres von oben nach unten = links nach rechts	72
Abb. 57: Oberer (links) und unterer (rechts) Teil des Versuchsrohres	73
Abb. 58: Längsschnitt der Plastikfalsche (links), Detail rechts	73
Abb. 59: Ausbreitkuchen des siebenten Betonversuchs	82
Abb. 60: Ausbreitkuchen des neunten Betonversuchs.....	85
Abb. 61: Ausbreitkuchen des elften Betonversuchs	88
Abb. 62: Ausbreitkuchen des zwölften Betonversuchs.....	89
Abb. 63: Ausbreitkuchen des vierzehnten Versuchs.....	92
Abb. 64: Versuchskörper des vierzehnten Betonversuchs.....	92
Abb. 65: Ergebnisse der ersten Druckversuchsreihe (1A-1 bis 1C-2)	93
Abb. 66: Querschnitte der Versuchskörper 1A bis 1C (von links nach rechts)	94
Abb. 67: Ergebnis der zweiten Biegeversuchsreihe (2A bis 2C)	95
Abb. 68: Ergebnisse der zweiten Druckversuchsreihe (2A-1 bis 2C-2).....	96
Abb. 69: Ausbreitkuchen des fünfzehnten Versuchs.....	98
Abb. 70: Granulierter Beton in der Mischmaschine.....	99
Abb. 71: Ausbreitkuchen des siebzehnten Betonversuchs	100
Abb. 72: Ausbreitkuchen des achtzehnten Betonversuchs	102
Abb. 73: Ausbreitkuchen des neunzehnten Betonversuchs	103
Abb. 74: Ergebnis der dritten Biegeversuchsreihe (3A bis 3C)	105
Abb. 75: Ergebnis der dritten Druckversuchsreihe (3A-1 bis 3C-2).....	106
Abb. 76: Querschnitte der Versuchskörper 3A bis 3C (von links nach rechts)	107
Abb. 77: Ergebnis des vierten Biegeversuchs (4A bis 4C).....	107
Abb. 78: Ergebnis der vierten Druckversuchsreihe (4A-1 bis 4C-2).....	108
Abb. 79: Ergebnis des fünften Biegeversuchs (5A bis 5C).....	111
Abb.80: Ergebnis der fünften Druckversuchsreihe (5A-1 bis 5C-2).....	112

Abb. 81: Querschnitte der Versuchskörper 5A bis 5C (von links nach rechts)	113
Abb. 82: Ergebnis des sechsten Biegeversuchs (6A bis 6C)	113
Abb. 83: Ergebnis der sechsten Druckversuchsreihe (6A-1 bis 6C-2).....	114

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beton Geschichte.....	9
Tabelle 2: Mehlkorngelalt der SVB-Typen	14
Tabelle 3: Luftporengehalt im Frischbeton nach verschiedenen Quellen	15
Tabelle 4: Gliederung der verfügbaren Leichtzuschläge [5]	32
Tabelle 5: Europäische Leichtzuschläge (Auswahl) im Überblick [14].....	33
Tabelle 6: Bestimmung der Saugfähigkeit von Liapor Granulat 4 bis 8	37
Tabelle 7: Bestimmung der Saugfähigkeit von Liapor Granulat 1/4, 4/8 und 8/16	38
Tabelle 8: Mischungsverhältnis der ersten Versuchsreihe	41
Tabelle 9: Mischungsentwurf der zweiten Versuchsreihe	43
Tabelle 10: Mischungsentwurf der dritten Versuchsreihe.....	43
Tabelle 11: Mischungsentwurf der vierten Versuchsreihe	44
Tabelle 12: Ermittlung des Ausbreitmaßes für Flugasche und Kalksteinmehl	47
Tabelle 13: Mischungsentwurf der fünften Versuchsreihe.....	48
Tabelle 14: Mischungsentwurf der sechsten Versuchsreihe	48
Tabelle 15: Mischungsentwurf der siebenten Versuchsreihe	49
Tabelle 16: Mischungsentwurf der achten Versuchsreihe	50
Tabelle 17: Mischungsentwurf der neunten Versuchsreihe.....	51
Tabelle 18: Mischungsentwurf der zehnten Versuchsreihe	52
Tabelle 19: Mischungsentwurf der elften Versuchsreihe.....	53
Tabelle 20: Zusammenfassung der neunten bis elften Versuchsreihe	54
Tabelle 21: Optimaler W/B-Wert.....	56
Tabelle 22: Ideale Mischung aus Versuchsreihe 9 bis 11	56
Tabelle 23: Setzfließmaß der idealen Leimmischung	57
Tabelle 24: Mischungsentwurf des ersten Mörtelversuches.....	57
Tabelle 25: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des ersten Mörtelversuches.....	58
Tabelle 26: Mischungsentwurf des zweiten Mörtelversuches.....	59
Tabelle 27: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des zweiten Mörtelversuches.....	59
Tabelle 28: Ergebnis des zweiten Mörtelversuches	59
Tabelle 29: Mischungsentwurf des dritten Mörtelversuchs.....	60
Tabelle 30: Ergebnis des dritten Mörtelversuchs	60
Tabelle 31: Mischungsentwurf des vierten Mörtelversuchs.....	61
Tabelle 32: Ergebnis des vierten Mörtelversuchs	61
Tabelle 33: Mischungsentwurf des fünften Mörtelversuchs.....	62
Tabelle 34: Ergebnis des fünften Mörtelversuchs	62
Tabelle 35: Mischungsentwurf des sechsten Mörtelversuchs	63
Tabelle 36: Ergebnis des sechsten Mörtelversuchs.....	63
Tabelle 37: Mischungsentwurf des siebenten Mörtelversuchs	64
Tabelle 38: Ergebnis des siebenten Mörtelversuchs.....	64
Tabelle 39: Mischungsentwurf des achten Mörtelversuchs.....	65
Tabelle 40: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des achten Mörtelversuchs	66
Tabelle 41: Ergebnis des achten Mörtelversuchs	66
Tabelle 42: Mischungsentwurf des neunten Mörtelversuchs.....	67
Tabelle 43: Ergebnis des neunten Mörtelversuchs	67
Tabelle 44: Mischungsentwurf des zehnten Mörtelversuchs	68
Tabelle 45: Ergebnis des zehnten Mörtelversuchs	68
Tabelle 46: Mischungsentwurf des elften Mörtelversuchs.....	69
Tabelle 47: Ergebnis des elften Mörtelversuchs	70

Tabelle 48: Auslaufzeit des Mörtels	71
Tabelle 49: Mischungsentwurf für Aufschwimmversuch.....	74
Tabelle 50: Mischungsentwurf des ersten Betonversuches	75
Tabelle 51: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des ersten Betonversuches	76
Tabelle 52: Mischungsentwurf des zweiten Betonversuches	76
Tabelle 53: Unterscheid von erster zu zweiter Betonmischung.....	77
Tabelle 54: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des zweiten Betonversuches	77
Tabelle 55: Zusätzlicher Wasseranteil durch die Saugfähigkeit des Granulates	77
Tabelle 56: Mischungsentwurf der dritten Betonmischung	78
Tabelle 57: Mischungsentwurf der vierten Betonmischung	79
Tabelle 58: Zusätzlicher Wasseranteil durch die Saugfähigkeit des Granulates	79
Tabelle 59: Mischungsentwurf des fünften Betonversuches	80
Tabelle 60: Mischungsentwurf der sechsten Betonmischung.....	80
Tabelle 61: Ergebnis des sechsten Betonversuches	81
Tabelle 62: Mischungsentwurf der siebenten Betonmischung	81
Tabelle 63: Ergebnis des siebenten Betonversuchs	82
Tabelle 64: Mischungsentwurf der achten Betonmischung	83
Tabelle 65: Prozentuelle Aufteilung der Inhaltsstoffe des achten Betonversuches.....	83
Tabelle 66: Mischungsentwurf des neunten Betonversuchs	84
Tabelle 67: Ergebnis des neunten Betonversuchs.....	84
Tabelle 68: Mischungsentwurf des zehnten Betonversuchs	85
Tabelle 69: Ergebnis des zehnten Betonversuchs	85
Tabelle 70: Ergebnis der Kontrollmischung	86
Tabelle 71: Weiteres Ergebnis der Kontrollmischung	86
Tabelle 72: Mischungsentwurf des elften Versuchs	87
Tabelle 73: Ergebnis des elften Betonversuchs	87
Tabelle 74: Mischungsentwurf des zwölften Betonversuchs	89
Tabelle 75: Ergebnis des zwölften Betonversuchs.....	89
Tabelle 76: Mischungsentwurf des dreizehnten Betonversuchs.....	90
Tabelle 77: Ergebnis des dreizehnten Betonversuchs	90
Tabelle 78: Mischungsentwurf des vierzehnten Betonversuchs.....	91
Tabelle 79: Ergebnis des vierzehnten Betonversuchs	91
Tabelle 80: Kubatur und Gewicht der ersten sechs Versuchskörper.....	93
Tabelle 81: Ergebnisse der ersten Druckversuchsreihe (1A-1 bis 1C-2).....	94
Tabelle 82: Ergebnis des zweiten Biegeversuchs.....	95
Tabelle 83: Ergebnisse der zweiten Druckversuchsreihe (2A-1 bis 2C-2).....	96
Tabelle 84: Mischungsentwurf des fünfzehnten Betonversuchs.....	97
Tabelle 85: Mischungsentwurf des sechzehnten Betonversuchs	98
Tabelle 86: Mischungsentwurf des siebzehnten Betonversuchs	99
Tabelle 87: Ergebnis des siebzehnten Betonversuchs.....	100
Tabelle 88: Mischungsentwurf des achtzehnten Betonversuchs.....	101
Tabelle 89: Ergebnis des achtzehnten Betonversuchs	101
Tabelle 90: Mischungsentwurf des neunzehnten Betonversuchs.....	102
Tabelle 91: Ergebnis des neunzehnten Betonversuchs	102
Tabelle 92: Mischungsentwurf des zwanzigsten Betonversuchs.....	103
Tabelle 93: Ergebnis des zwanzigsten Betonversuchs	104
Tabelle 94: Kubatur und Gewicht der zweiten sechs Versuchskörper.....	104
Tabelle 95: Ergebnis des dritten Biegeversuchs (3A bis 3C)	105

Tabelle 96: Ergebnis der dritten Druckversuchsreihe (3A-1 bis 3C-2).....	106
Tabelle 97: Ergebnis des vierten Biegeversuchs (4A bis 4C).....	108
Tabelle 98: Ergebnis der vierten Druckversuchsreihe (4A-1 bis 4C-2).....	108
Tabelle 99: Mischungsentwurf des einundzwanzigsten Betonversuchs	109
Tabelle 100: Ergebnis des einundzwanzigsten Betonversuchs.....	110
Tabelle 101: Ergebnis des zweiundzwanzigsten Betonversuchs	110
Tabelle 102: Kubatur und Gewicht der dritten sechs Versuchskörper	110
Tabelle 103: Ergebnis des fünften Biegeversuchs (5A bis 5C)	111
Tabelle 104: Ergebnis der fünften Druckversuchsreihe (5A-1 bis 5C-2).....	112
Tabelle 105: Ergebnis des sechsten Biegeversuchs (5A bis 5C)	114
Tabelle 106: Ergebnis der sechsten Druckversuchsreihe (6A-1 bis 6C-2)	114
Tabelle 107: Zusammenfassung der Leimversuche	116
Tabelle 108: Zusammenfassung der Mörtelversuche	117
Tabelle 109: Zusammenfassung der Betonversuche	117

9 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der groben Gesteinskörnung	16
Formel 2: Berechnung der feinen Gesteinskörnung.....	16
Formel 3: Berechnung des mittleren Durchmessers	18
Formel 4: Berechnung des Ausbreitmaßes.....	19
Formel 5: Messgröße für Trichterauslauf-Versuch.....	19