



Matthias Reiner, BSc

Entwicklung eines selbstverdichtenden Betons für Lunker-freie und gegen lösenden Angriff beständige Fertigteile

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Juhart

Dipl.-Ing. Ing. Gheorghe Alexandru David

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie
mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich vor allem meinen Eltern danken, die mir ermöglicht haben zu studieren. Ein weiterer Dank gilt meinen älteren Schwestern, die als Wegbereiter zum Studium fungierten.

Großer Dank gilt Dipl.-Ing. Dr.techn. Juhart und Dipl.-Ing. Ing. David, die mich in zahlreichen Gesprächen und während der Durchführung der Versuche unterstützten und mir die Erstellung dieser Masterarbeit ermöglichten. Ebenfalls seien an dieser Stelle Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Mittermayr und Dipl.-Ing. Dr.mont. Krischey erwähnt, welche wertvolle Anregungen lieferten.

Gleichermaßen möchte ich allen danken, durch die meine Studienzzeit zu dem wurde, was sie ist. Besonders Georg Moritz, Andreas Innerhofer und Georg J. Vienna.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden mittels einer Literaturrecherche verschiedene Ansätze des Mixdesigns für selbstverdichtenden Beton aufgezeigt. Für das angestrebte Anwendungsgebiet eines Industriepartners als Trinkwasserspeicher aus Betonfertigteilen mit Lunker-freier Oberfläche wurde das Mixdesign nach Okamura in der Folge angewandt.

Das Ergebnis dieser Arbeit sind zwei Rezepturvorschläge. Die erste Rezeptur bietet verbesserte rheologische Eigenschaften im Vergleich zur Ausgangsmischung, die zweite zusätzlich eine Leimzusammensetzung mit der hohe Beständigkeit gegen lösenden Angriff erreicht werden kann.

Mit den entwickelten Rezepturen konnten passende Früh- und Endfestigkeiten, eine gute Konsistenz und eine sehr starke Selbstentlüftung sowie ein hoher Widerstand gegen lösenden Angriff gewährleistet werden. Die Betonrezeptur wurde ausgehend von einer Ausgangsrezeptur des Industriepartners durch eine angepasste Korngrößenverteilung sowie durch den Einsatz von Eco- und Mikrofüllern verbessert.

Im Zuge von Versuchsreihen im Labor ergaben sich Korngrößenverteilungen mit mehr Grobkornanteil. Um die Leimzusammensetzung im Hinblick auf die Rheologie sowie die Beständigkeit gegen lösenden Angriff zu optimieren, wurde der inerte Füller (Gesteinsmehl) durch Hüttensand (AHWZ) ersetzt. Dies sorgt zusammen mit dem verwendeten C₃A-freien Zement für einen resistenten Bindemittelleim. Um die Stabilität der Mischungen zu gewährleisten, kam ein sehr feiner inerter Füller (Kalksteinmehl als Mikrofüller) zum Einsatz. Durch die Veränderung der Betonzusammensetzung konnte für beide Rezepturvorschläge eine Verbesserung der Konsistenz sowie eine deutliche Zusatzmittelreduktion erzielt werden. Ebenfalls bringt der teilweise Ersatz des Zementes durch Hüttensand geringere Treibhausgasemissionen und einen geringeren Primärenergiebedarf mit sich.

Nach dem isländischen Eco-SCC-Konzept wurde darüber hinaus eine Rezeptur mit nur 50% Zement (im Vergleich zur Ausgangsrezeptur) untersucht, die gute selbstverdichtende Eigenschaften aufwies, aufgrund der geringen Frühfestigkeit jedoch nicht für den Einsatz im Fertigteilwerk geeignet ist.

Abstract

Development of a self-compacting concrete for precast elements with pore-free surface and resistance against chemical solvent attack

In this Master's thesis at first different approaches to mix design for self-compacting concrete were pointed out according to literature. The mix design by Okamura was applied to achieve a self-compacting concrete with pore-free surface for precast elements to be used in a reservoir for potable water of an industrial partner.

The Master thesis resulted in two mix designs proposed. The first recipe offers improved flowability compared to the base recipe, the second one additionally a paste composition with high resistance against solvent attack.

The developed concrete recipes show suitable early and final strength, a good consistency and strong self-deaeration as well as great resistance against solvent attack. The mix design was achieved by adjusting the particle size distribution of a base recipe from the industry partner and using eco-fillers and micro-fillers. In a series of experiments a particle size distribution with more coarse-grained particles turned out to be most suitable. In order to optimise the paste composition in regard to rheology and stability against solvent attack the mineral (dolomite) filler was substituted by blast furnace slag. In combination with the use of C₃A-free cement a resistant paste was insured subsequently. In order to enhance the stability of the mix, very fine limestone filler was used. The alteration of the concrete mix improved the consistence and reduced the admixture content in both proposed recipes. Furthermore the partial substitution of cement by blast furnace slag led to reduced greenhouse emissions and a lower primary energy demand.

Additionally with the Icelandic concept for eco self-compacting concrete a further recipe containing only 50% cement (compared to the base recipe) was developed. This concrete offered good self-compacting quality but is not suitable for the use in prefabrication due to low early-age strength.

Inhaltsverzeichnis

0	Glossar	1
1	Einleitung	2
1.1	Hintergrund und Motivation	2
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Zusammenfassung der Anforderungen	3
2	Stand der Technik	4
2.1	Baustoff Selbstverdichtender Beton	4
2.1.1	Rheologie von SCC.....	4
2.2	Internationaler Vergleich des Mix-Designs von SCC	7
2.2.1	Mixdesign nach Okamura/Japan	12
2.2.2	Mixdesign nach Wallevik/Island.....	16
2.2.3	Mixdesign in Österreich.....	18
2.2.4	Ansatz der optimierten Packungsdichte.....	18
2.2.5	Ansatz der optimierten Kornverteilung.....	20
2.2.6	Statistischer Ansatz.....	21
2.2.7	Matrix-Modell Ansatz.....	21
2.3	Beständigkeit gegen lösenden Angriff	23
2.3.1	Angriff durch weiche Wässer.....	24
2.3.2	Angriff durch Säuren	25
3	Ausgangsstoffe und deren Einfluss	27
3.1	Wasser.....	27
3.2	Zement.....	27
3.3	Zusatzstoffe.....	28
3.3.1	Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe.....	30
3.3.2	Inerte Zusatzstoffe bzw. Füllstoffe	32
3.4	Gesteinskörnung	34
3.5	Zusatzmittel.....	36
3.5.1	Fließmittel	36
3.5.2	Konsistenzhalter.....	37
3.5.3	Entlüfter.....	37
4	Entwicklung der Betonrezeptur mit besonderen Anforderungen	38
4.1	Anforderungen	38

4.1.1	Geforderte Frischbetoneigenschaften	38
4.1.2	Geforderte Festbetoneigenschaften	39
4.2	Prüfkörper und Prüfverfahren	40
4.2.1	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper.....	40
4.2.2	Prüfverfahren	41
4.3	Ausgangsrezeptur	44
4.4	Schwerpunkte der Rezepturveränderung	47
4.4.1	Zusatzmittel.....	47
4.4.2	Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung	47
4.4.3	Ecofüller	49
4.4.4	Mikrofüller	50
4.4.5	Leimvolumen.....	51
4.4.6	Wassergehalt und w/b Wert	51
5	Ergebnisse und Diskussion.....	52
5.1	Verhalten des Frischbetons	52
5.1.1	Einfluss der Zusatzmittel	52
5.1.2	Einfluss der Korngrößenverteilung	54
5.1.3	Einfluss der Leimzusammensetzung	55
5.1.4	Einfluss eines Mikrofüllers.....	57
5.2	Druckfestigkeit.....	61
5.2.1	Druckfestigkeit nach 24h	61
5.2.2	Druckfestigkeit nach 28d	61
5.3	Beständigkeit gegen lösenden Angriff	62
5.4	Eco-SCC	67
5.5	GWP, PE, Preis.....	69
5.6	Weitere Beobachtungen	70
5.6.1	Fließmittelabsorption	70
5.7	Rezepturvorschlag SCC mit guten selbstverdichtenden Eigenschaften.....	70
5.8	Rezepturvorschlag SCC mit hoher Beständigkeit gegen lösenden Angriff.....	71
6	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick.....	73
	Literaturverzeichnis	75
	Abbildungsverzeichnis	77
	Tabellenverzeichnis	80

Anhang A – Datenblätter.....	82
-------------------------------------	-----------

0 Glossar

Mehlkorn	Feststoffe im Beton mit einer maximalen Größe von 125µm, unabhängig von ihrer hydraulischen Reaktivität (i.e. Zement, Zusatzstoffe, feinsten Anteil der Gesteinskörnung)
Leim	Gemisch aus Wasser, Luft und Mehlkorn
Mörtel	Gemisch aus Leim und Sand (bis 4mm)
Grobkorn	Kies, Gesteinskörnung > 4mm
SCC	Selbstverdichtender Beton (SVB), engl. Self-compacting concrete
CVC	Konventionell verdichteter Beton, engl. Conventional vibrated concrete
ECC	Leichtverdichtbarer Beton, engl. Easy-compacting concrete
Lunker	Durch eine Luftpore gebildeter Hohlraum an der Betonoberfläche
Selbstverdichtung	Verdichtung des Betons aufgrund seines Eigengewichtes ohne zusätzlich aufgebrachte Verdichtungsenergie
Frischbetonstabilität (Sedimentationsstabilität)	Sicherheit des Frischbetons gegen Entmischung
Konsistenzhaltung	Aufrechterhaltung der vorgegebenen Konsistenz des Frischbetons
Selbstentlüftung	Erreichen eines geringen Luftporengehaltes im Frischbeton

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Aufgrund wenig qualifizierter Bauarbeiter kam es in Japan in den 1980er Jahren vermehrt zu Dauerhaftigkeitsproblemen im Betonbau. Um der mangelnden Betonverdichtung entgegenzuwirken, entwickelte Okamura im Jahre 1986 erstmals einen selbstverdichtenden Beton. [1]

Dieser unterscheidet sich vor allem aufgrund seiner Frischbetoneigenschaften von konventionellem Beton. Er verdichtet sich nur aufgrund seines Eigengewichtes und füllt dabei die Schalung komplett aus. Durch seine Fließeigenschaften ist er geeignet selbst dicht verlegte Bewehrung vollständig zu ummanteln, ohne dabei Betonhohlräume zu bilden. Die Verdichtung des Betons ist also nicht mehr vom fachgerechten Rütteln abhängig, wodurch dieser Unsicherheitsfaktor wegfällt. Durch den Verzicht auf Rüttler können außerdem Lärm und Vibrationen vermieden werden. Dies verbessert die Arbeitsbedingungen auf der Baustelle bzw. in einem Fertigteilwerk (siehe Abbildung 1.1). [2]



Abbildung 1.1: Einbringen von SCC in einem Fertigteilwerk [2]

Weitere Vorteile wie das Einsparen von Arbeitsstunden beim Gießen von Bauteilen und die damit einhergehende schnellere Konstruktion machen SCC (self-compacting concrete) wirtschaftlich attraktiv. Zudem wirken sich die verbesserte Betonqualität und Dauerhaftigkeit des Betons positiv auf die Lebenszykluskosten aus. Deshalb wurde SCC bereits in den frühen 1990er Jahren in Japan und anschließend in Europa eingesetzt. Kurz darauf begannen in den USA Fertigteilwerke auf SCC zurückzugreifen. [3]

Auch in Österreich findet SCC vermehrt Anwendung. Vor allem in Fertigteilwerken können erhöhte Anforderungen an Mischgenauigkeit und Qualitätssicherung sichergestellt werden, wodurch selbstverdichtender Beton eine attraktive Alternative zu herkömmlich vibriertem Beton darstellt. Durch den Einsatz von SVB sind Lunker-freie Oberflächen und somit eine gute Sichtbetonqualität möglich. Dies ist vor Allem auf die gute Selbstentlüftung dieser Betone zurückzuführen, wodurch ein sehr geringer Luftporenanteil im Beton und an seiner Oberfläche erzielt werden kann.

1.2 Zielsetzung

Es soll ein selbstverdichtender Beton entwickelt werden, der in weiterer Folge für Trinkwasserbehälter aus Betonfertigteilen eingesetzt werden kann. Dieses Einsatzgebiet erfordert eine sehr fließfähige, sedimentationsstabile Mischung mit ausreichend langer Verarbeitungszeit. Eine hohe Selbstentlüftung sollte sichergestellt werden, um eine weitgehend lunkerfreie Betonoberfläche herstellen zu können. Als Basis für die Betonentwicklung dient dabei eine Betonmischung eines Industriepartners. Durch Veränderung dieser Ausgangsrezeptur werden die Eigenschaften des Betons an die gewünschten Anforderungen angepasst.

Am Beginn der Masterarbeit wird mittels einer Literaturrecherche analysiert, welche Betonrezepturen in verschiedenen Nationen zum Erreichen selbstverdichtender Eigenschaften verwendet werden und ob diese für die geplante Anwendung geeignet sind. Ausgehend von dieser Recherche werden verschiedene Rezepturen im Labor getestet und optimiert. In weiterer Folge wird die Betonrezeptur derart verändert, dass sie eine chemische Beständigkeit gegen lösenden Angriff aufweist, der u. a. durch einen Angriff von weichen Wasser auftreten kann.

1.3 Zusammenfassung der Anforderungen

Die wesentlichen Eigenschaften, die der zu entwickelnde SCC aufweisen soll, werden im Folgenden aufgelistet.

- Ökonomisch und ökologisch sinnvoll
- Lunkerfreie Oberfläche (sehr gute Selbstentlüftung)
- Fließmaß > 660mm
- Sicherheit gegen Absetzung grober Gesteinskörnungen
- Verarbeitungszeit > 30 Minuten für den Einbau in der Fertigteilproduktion
- Druckfestigkeitsklasse C 45/55

Für die Beständigkeit gegen lösenden Angriff:

- Beständigkeit gemäß Expositionsklasse XA3L [4]

2 Stand der Technik

2.1 Baustoff Selbstverdichtender Beton

Selbstverdichtender Beton besteht im Allgemeinen aus den Materialien wie herkömmlicher Beton auch. Die individuellen Frisch- und Festbetoneigenschaften werden durch die Veränderung des Mischverhältnisses und den Einsatz von Fließmittel erreicht [1]. Besonders die Frischbetoneigenschaften unterscheiden sich von jenen eines konventionell verdichteten Betons. SCC ist selbst verdichtend, selbst entlüftend und selbst nivellierend. Außerdem ist er sedimentationsstabil und entmischungsfrei. Die Hauptbestandteile sind wie bei konventionell vibriertem Beton im Wesentlichen:

- Wasser
- Zement
- Gesteinskörnung
- Zusatzmittel
- Zusatzstoffe (u.a. Füllstoffe)

Selbstverdichtende Eigenschaften können auf verschiedene Weise erreicht werden. Das Fließverhalten kann dabei durch das Modifizieren der Bestandteile und deren Zusammensetzung an die Bauteilanforderungen angepasst werden. Um die Eigenschaften des Frischbetons zu klassifizieren, eignet sich die Wissenschaft der Rheologie. [5]

2.1.1 Rheologie von SCC

Die Rheologie befasst sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten der Materie, sie kann auch als Fließkunde bezeichnet werden. [6]

Es muss eine gewisse Scherspannung im Frischbeton überwunden werden, damit dieser zu fließen beginnt, diese wird als Fließgrenze bezeichnet. Um die Fließgeschwindigkeit des Frischbetons weiter zu steigern, muss nach dem Modell von Bingham proportional mehr Scherspannung im Betongefüge überwunden werden. Die Steigung der Geraden μ wird als plastische Viskosität bezeichnet und ist in Abbildung 2.1 ersichtlich. [5]

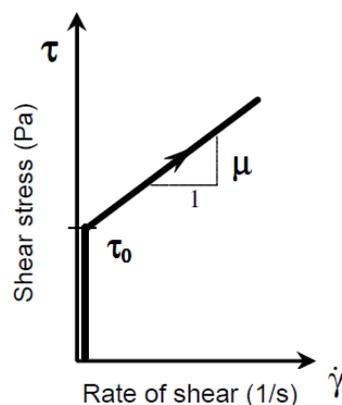


Abbildung 2.1: Idealisierter Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Scherrate nach Bingham [5]

In Abbildung 2.2 kann man erkennen, dass sich die Fließkurve von selbstverdichtendem Beton deutlich von den Fließkurven von Normalbeton und hochfestem Beton unterscheidet. Die Fließgrenze von SCC ist sehr gering. Im Normalfall ist sie unter 60 MPa und somit deutlich geringer als jene vom Normalbeton. Die Viskosität kann mit 20-100 MPa s stark variieren, sie stellt die Steigung der Geraden dar. [6]

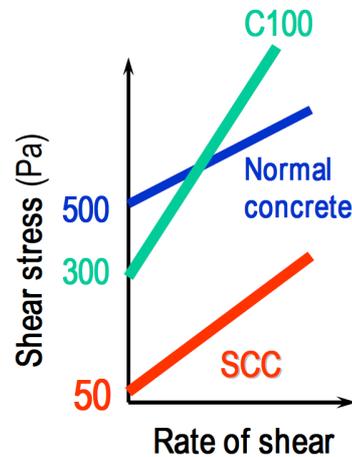


Abbildung 2.2: Fließkurven von Normalbeton, Hochfestem Beton und SCC [6]

Jedes Material, das dem Beton zugegeben werden kann, hat einen bestimmten Einfluss auf dessen rheologische Eigenschaften. Die Zugabe von Wasser, Luft und Mikrosilika kann zum Beispiel die plastische Viskosität herabsetzen [6]. In Abbildung 2.3 ist der Einfluss verschiedener Materialien auf die rheologische Eigenschaften des Frischbetons zu sehen. Die Zugabe von Wasser senkt gleichzeitig die plastische Viskosität und die Fließgrenze. Fließmittel senken die Fließgrenze, die plastische Viskosität wird von ihnen kaum beeinflusst. Mehr Luft im Frischbeton senkt die plastische Viskosität. Einen ähnlichen Effekt hat die Zugabe geringer Mengen an Mikrosilika. Eine größere Menge an Mikrosilika im Beton bewirkt den Anstieg der Fließgrenze.

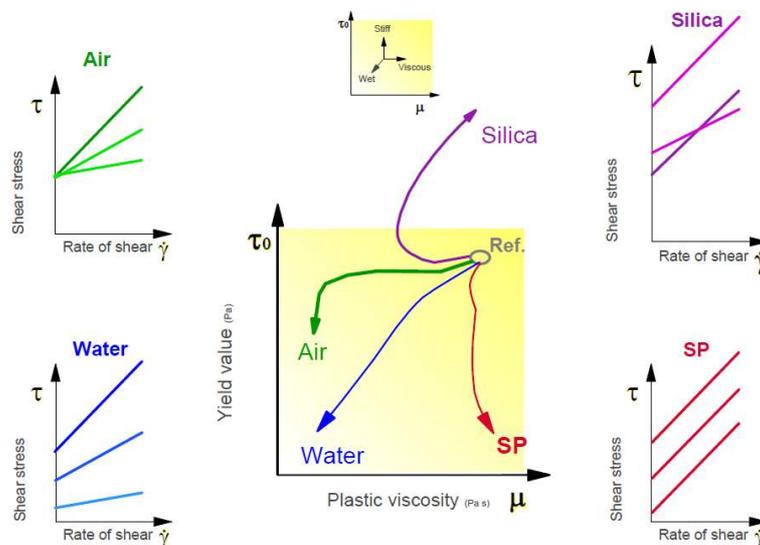


Abbildung 2.3: Einfluss verschiedener Materialien auf die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons [6]

Auch die Form und Kornverteilung der Zuschläge und des Zements haben, wie in Abbildung 2.4 ersichtlich, einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten des Frischbetons sowie der Packungsdichte des Betons. Die Verwendung von runder Gesteinskörnung hat einen ähnlichen Effekt wie die Zugabe von Wasser. [5]

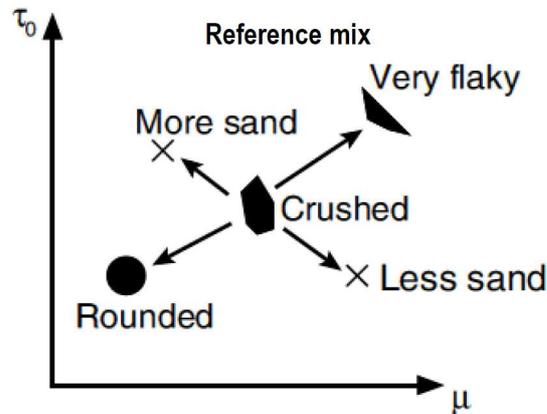


Abbildung 2.4: Einfluss der Gesteinskörnung auf das Verhalten des Frischbetons [5]

Die Frischbetoneigenschaften können durch Veränderung der Ausgangsmaterialien oder deren Mischungsverhältnis an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden. Wenn die plastische Viskosität des Frischbetons niedrig ist, sollte die Fließgrenze nicht zu klein sein, um ein Absetzen der Gesteinskörnung zu verhindern. Ist die plastische Viskosität hingegen hoch, sollte die Fließgrenze gering sein, damit sich der Beton bewegen kann. Horizontale Bauteile, wie zum Beispiel Träger, erfordern eine geringe Viskosität. Für vertikale Bauteile, wie Wände, sollte die Viskosität höher sein. Anhand verschiedener Tests wie dem V-Trichter Test und dem Fließmaß kann man Hinweise auf diese rheologischen Eigenschaften bekommen. Mit Hilfe von Betonrheometern oder Viskosimeter lassen sich relative Fließgrenze und relative Viskosität angeben. Wallevik empfiehlt die in Abbildung 2.5 dargestellten Bereiche für verschiedene Anforderungen an den SCC. [5]

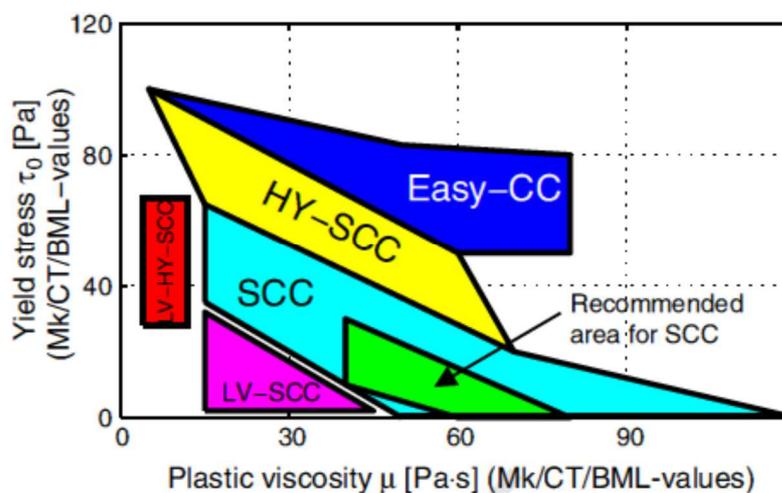


Abbildung 2.5: Empfohlener Bereich für SCC [5]

Folgende Bereiche sind dabei dargestellt:

- LV-SCC (Low viscosity-SCC): SCC mit niedriger plastischen Viskosität
- SCC (Self-compacting concrete): Selbstverdichtender Beton
- Recommended area for SCC: Empfohlener Bereich für SCC
- LV-HY-SCC (LV-high yield stress-SCC): SCC mit niedriger plastischen Viskosität und hoher Fließgrenze
- HY-SCC (high yield stress-SCC): SCC mit hoher Fließgrenze
- Easy-CC (Easy compacting concrete): Leicht verdichtbarer Beton

2.2 Internationaler Vergleich des Mix-Designs von SCC

Die erste Definition eines SCC wurde 1988 von Okamura und seinen Studenten in Japan vorgenommen. Dieser Beton stellt den Beginn des modernen SCC dar, welcher ein Hochleistungsbeton ist. Das bedeutet gute und verlässliche Qualität, gute Oberflächenqualität, hohe Betonfestigkeit und gute Dauerhaftigkeit. Schon vor den 80er Jahren wurde Beton bei verschiedensten Bauten ohne Verdichtungsmaßnahmen eingebaut und kann deshalb als selbstverdichtender Beton charakterisiert werden. So wurde bereits 1920 ein Damm in Deutschland ohne Verdichtung des Betons errichtet, dies ist in Abbildung 2.6 ersichtlich. Auch in Frankreich, Spanien und Norwegen wurden in den 70er Jahren ähnliche Betone verwendet. Diese Betone benötigten zwar keine Verdichtung, verfügen jedoch über geringe Betondruckfestigkeiten und weisen keine konsistente Qualität auf, weshalb sie nicht der Definition eines modernen SCC entsprechen. [3] [6]

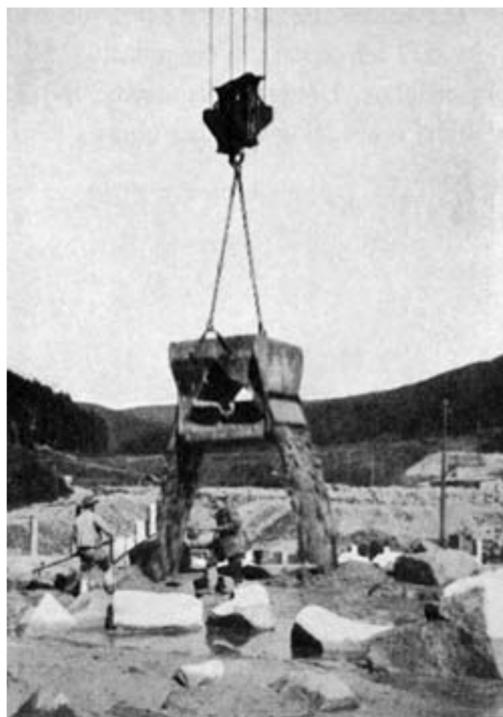


Abbildung 2.6: Betonage eines Damms in Deutschland im Jahre 1920 [6]

Heute gibt es weltweit große Unterschiede in der Betontechnologie. Dementsprechend variieren die verwendeten Normalbetone in ihrer Zusammensetzung. Noch deutlicher ist dies bei selbst verdichtendem Beton zu erkennen. Dieses Phänomen ist durch unterschiedliche zur Verfügung stehende Ausgangsmaterialien sowie der Tradition der Nationen im Umgang mit Beton zu erklären. Eine Betonmischung kann in einem Land ökonomisch sinnvoll sein, während sie in einem anderen Land viel zu kostspielig ist. Ebenfalls spielt die Experimentierfreudigkeit einzelner Personen oftmals eine wesentliche Rolle für eine Nation. [6]

Im Allgemeinen weicht die Rezeptur von selbstverdichtendem Beton häufig nur leicht von jener des Normalbetons ab. Dadurch konnte schnelle Akzeptanz in der Industrie erreicht werden, da die Produktion ohne großen Aufwand umgestellt werden konnte. Dies stellt jedoch kein Optimum dar. [6]

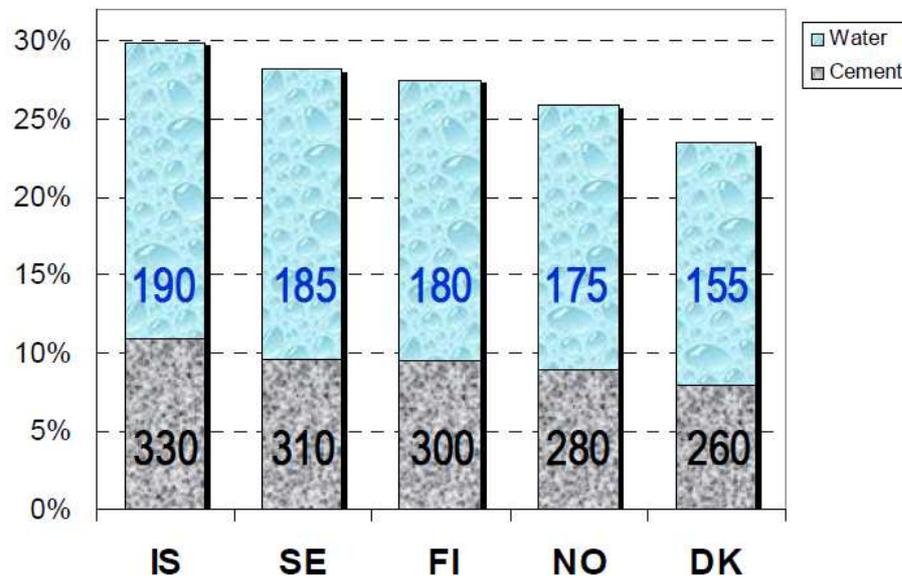


Abbildung 2.7: Gegenüberstellung von Normalbeton der nordischen Länder [6]

Abbildung 2.7 zeigt einen Vergleich der Zusammensetzung des Normalbetons in den Ländern Island, Schweden, Finnland, Norwegen und Dänemark für eine Druckfestigkeitsklasse von C20/25.

Ein Diagramm, das die Beziehung Fließgrenze-plastische Viskosität darstellt, zeigt eine mögliche Klassifizierung selbstverdichtender Betone. Ist die Fließgrenze sehr gering, sollte die plastische Viskosität höher sein, um einen funktionierenden selbstverdichtenden Beton zu erhalten. Ist diese Fließgrenze jedoch hoch, so sollte die Viskosität eher gering sein. Dieser Zusammenhang wurde von Wallevik/Nielsson in einem sog. Rheographen veranschaulicht (Abbildung 2.8). SCC sollte im äußeren gelben Bereich liegen. Die orange Zone stellt ein Optimum dar. Des Weiteren wurde das erforderliche Fließmaß eingetragen, das für den selbstverdichtenden Beton gewährleistet sein sollte. Dieses korreliert mit der Fließgrenze. [6]

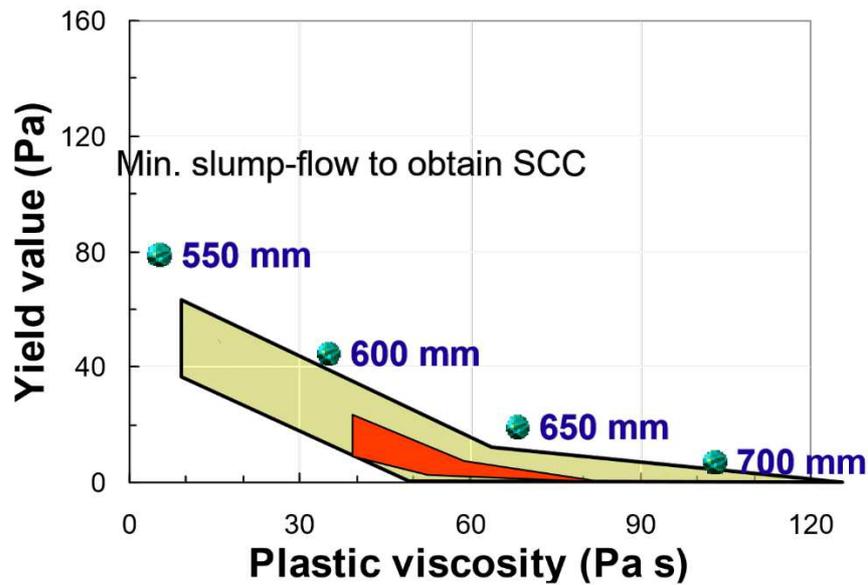


Abbildung 2.8: Vorgeschlagener Bereich für SCC [6]

Ein ähnlicher Ansatz wird in Österreich und Deutschland verfolgt, hier werden das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit in einem Diagramm (Abbildung 2.9) gegenübergestellt. Befinden sich diese beiden Kenngrößen in einem geeigneten Verhältnis zueinander, können selbstverdichtende Eigenschaften erreicht werden. Dieses Bereich wird in Abbildung 2.9 in blau dargestellt. Ist das Setzfließmaß zu hoch; kommt es zu einer Sedimentation. Ist die Trichterauslaufzeit zu hoch, kommt es zur Stagnation. [7]

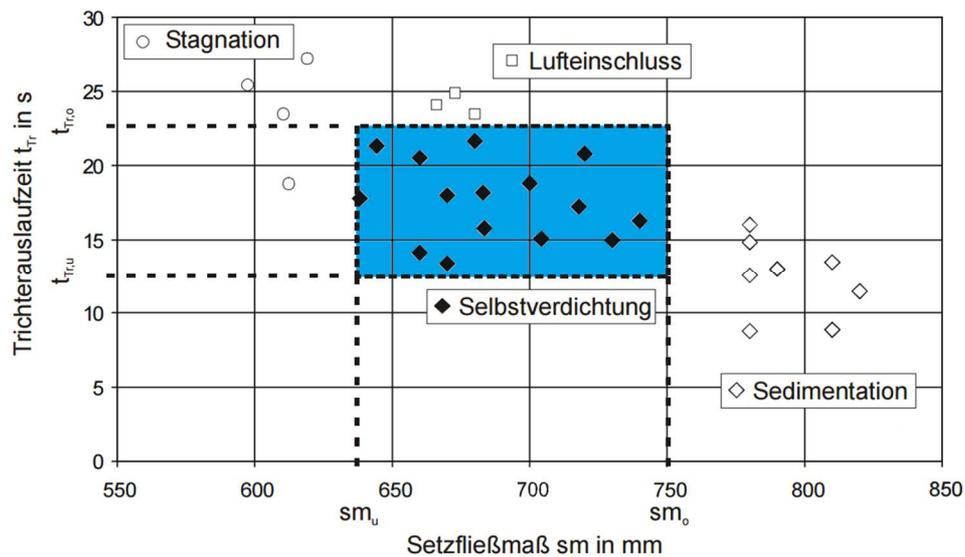


Abbildung 2.9: Verarbeitbarkeitsbereich eines Selbstverdichtenden Betons [7]

Die Fließeigenschaften eines Selbstverdichtenden Betons können, wie in Abbildung 2.10 dargestellt, stark schwanken. In Japan, Schweden und den Niederlanden wird SCC aufgrund eines hohen Wasser-Mehlkorngehaltes mit hoher plastischer Viskosität hergestellt. Entsprechend ist die Fließgrenze gering. In Norwegen, der Schweiz und Island (sog. Eco-SCC) wird SCC mit geringer Viskosität und höherer Fließgrenze hergestellt. [6]

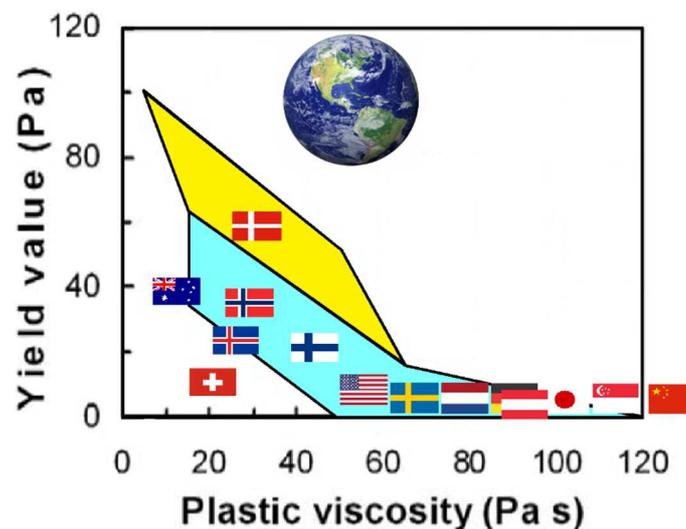


Abbildung 2.10: Rheologische Eigenschaften von SCC nach der Praxis in verschiedenen Nationen, Inhalt aus [6]

Dementsprechend unterscheiden sich die Bestandteile und Mischverhältnisse der Betone in verschiedenen Nationen deutlich voneinander. Während der Mehlkornanteil in Dänemark üblicherweise etwa 360 kg/m^3 beträgt, kann jener in Deutschland 600 kg/m^3 betragen. In der österreichischen Richtlinie für selbst- und leichtverdichtbaren Beton wird ein Mehlkorngehalt von 500 kg/m^3 empfohlen [8]. Tabelle 2.1 zeigt eine Gegenüberstellung der SCC-Rezepturen in verschiedenen Ländern, welche entsprechend ihrer Eigenschaften gruppiert sind [9]

	Mehlkorn [kg/m^3]	Wasser [kg/m^3]	Fließgrenze [Pa]	Pl. Viskosität [Pa s]
Schweden	>550	180	0-30	50-100
Niederlande	>550	190	0-10	60-120
Japan	>550	170	0-30	50-120
Schweiz	<450	200	0-50	10-20
Norwegen	<450	170	10-50	30-45
Island	<450	180	10-50	20-40
Dänemark	<450	160	30-60	<40
Großbritannien	>500	210	10-50	50-80
Österreich	>500	190-210	0-10	60-90
Deutschland	>500	180	0-10	60-90
USA	>500	190	0-20	40-120

Tabelle 2.1: Vergleich typischer Mischverhältnisse von SCC in verschiedenen Nationen; Daten aus [6]

In Tabelle 2.2 werden fünf typische Betonrezepturen von Deutschland, Schweden, Dänemark, Norwegen und Island (Eco-SCC) angeführt um die deutlichen Unterschiede der Mischungen zu veranschaulichen.

	GER	SWE	DK	NO	ECO
Zement	315	330	315	330	235
Mikrosilika	-	-	11	27	-
Flugasche	275	-	27	-	50
Kalkst. Füller	-	185	-	-	-
Summe Mehlkorn	590	515	353	357	285
Wasser	165	180	150	175	185
Fließmittel	5,3	3,5	1,5	2,6	2,9
Stabilisierer	0,34	-	-	-	3,42

Tabelle 2.2: Betonzusammensetzung für SCC in verschiedenen Nationen und für „ECO“ [9]

Das Leimvolumen (i.e. Summe aus Mehlkorn, Wasser und Zusatzmitteln sowie Luftporen) der Mischungen unterscheidet sich deutlich. Die Betonrezeptur aus Deutschland weist, wie in Abbildung 2.11 ersichtlich, das größte Leimvolumen auf, jene aus Dänemark das geringste.

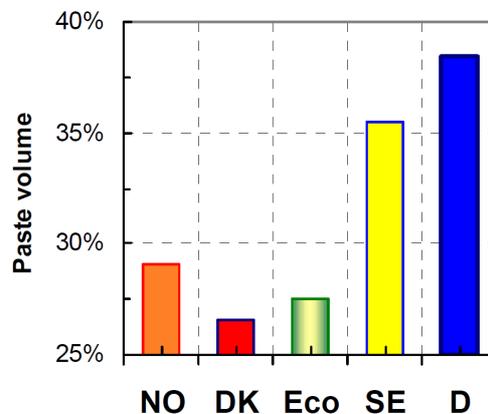


Abbildung 2.11: Leimvolumen der verschiedenen Betonrezepturen [9]

Auch die rheologischen Eigenschaften der Mischungen unterscheiden sich sehr. Der Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Fließmaß ist in Abbildung 2.12 klar zu erkennen. Je höher die zu überwindende Fließgrenze, desto geringer fällt das Fließmaß aus.

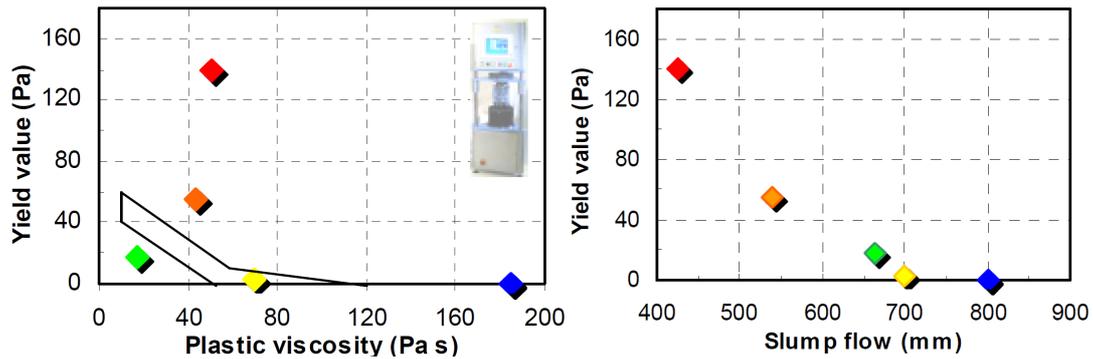


Abbildung 2.12: Vergleich der Rheologie verschiedener Betone [9] grün: Eco-SCC; orange: NO; rot: DK; gelb: SE; blau: D

Die Fließzeit hingegen steht in Korrelation mit der plastischen Viskosität. Die niedrige plastische Viskosität des Eco-SCC aus Island macht sich durch eine hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit bemerkbar. In Abbildung 2.13 wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der oben erwähnten Rezepturen gegenübergestellt [9]

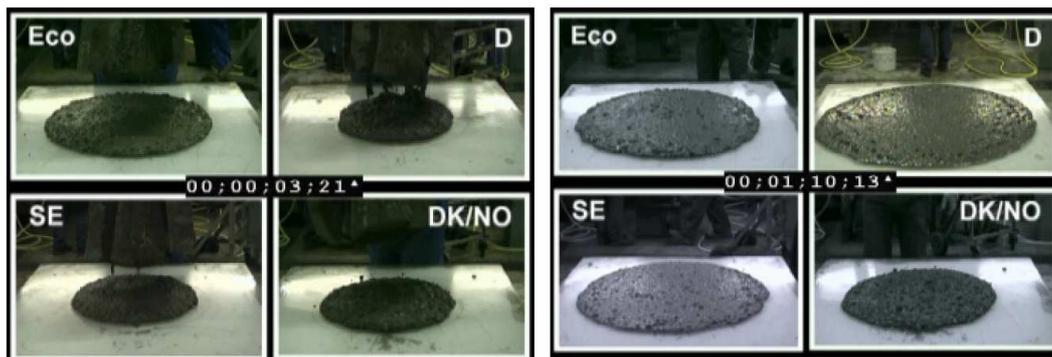


Abbildung 2.13: Fließmaß der Betone nach 3s und 70s [9]

Im folgenden Abschnitt wird auf die verschiedenen Ansätze des Mix-Designs näher eingegangen.

2.2.1 Mixdesign nach Okamura/Japan

Nachdem Okamura im Jahre 1986 erstmals den Vorschlag eines selbstverdichtenden Betons machte, wurde ein Prototyp dieser Betonart im Jahre 1988 angefertigt. Dieser bestand aus in der Baupraxis üblichen Materialien und erwies sich als zufriedenstellend. Der Zementleim weist eine hohe Verformbarkeit (geringe Fließgrenze) auf. Durch die hohe plastische Viskosität kommt es zu keinem Absetzen grober Gesteinskörnungen, wenn der Beton durch enge Passagen fließt, wie es zum Beispiel zwischen Bewehrung der Fall ist. Okamura und Ozawa schlagen folgende Eckpunkte für SCC vor: [1]

- Weniger grobe Gesteinskörnung als bei „Rüttelbeton“
- Niedriger Wasser/Bindemittel-Wert (w/b Wert)
- Verwendung von Fließmittel

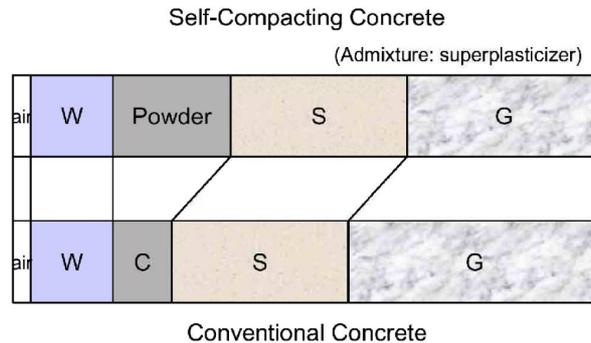


Abbildung 2.14: Vergleich der Inhaltsstoffe von SCC und konventionellen Beton [1]

Abbildung 2.14 und Abbildung 2.15 veranschaulichen, dass man für gute Verdichtungseigenschaften den Mehlkornanteil erhöht und gleichzeitig den Anteil der Gesteinskörnungen reduziert. Durch Verwendung eines Fließmittels können die erforderlichen Frischbetoneigenschaften trotz niedrigem Wasser-Bindemittelgehalt erreicht werden. Eine entscheidende Rolle spielt das Verhältnis Wasser zu Mehlkornanteil bzw. „water/powder - ratio.“ [1]

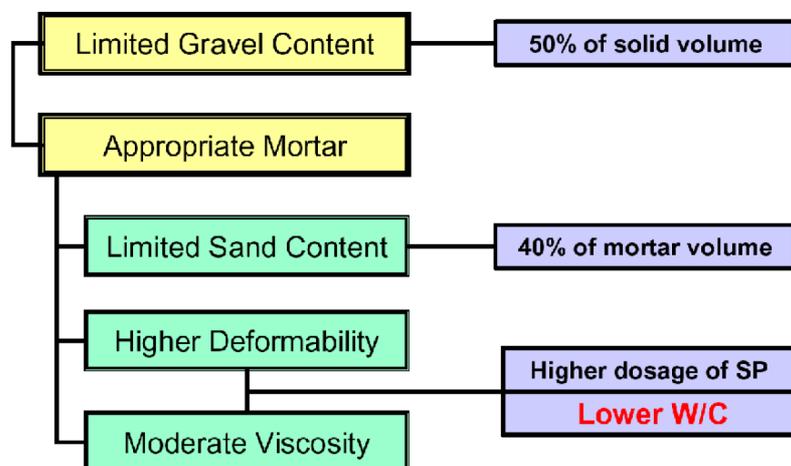


Abbildung 2.15: Methoden um selbstverdichtenden Beton zu erhalten [1]

Die Erstellung der Betonrezeptur erfolgt in folgenden Schritten: [1] [10]

- Festlegung des Luftporengehaltes
- Die grobe Gesteinskörnung wird als 50 Vol-% der gesamten Feststoffe festgelegt
- Die feine Gesteinskörnung wird als 40% des Mörtelvolumens festgelegt, dabei werden in Japan Feststoffe kleiner als 90µm als Mehlkorn, nicht als Gesteinskörnung definiert
- Das Volumenverhältnis Wasser/Mehlkorn (V_w/V_p) wird zwischen 0,9 und 1,0 angenommen
- Die erforderliche Menge an Fließmittel wird bestimmt

In Abbildung 2.16 und Abbildung 2.17 werden diese Überlegungen grafisch veranschaulicht.

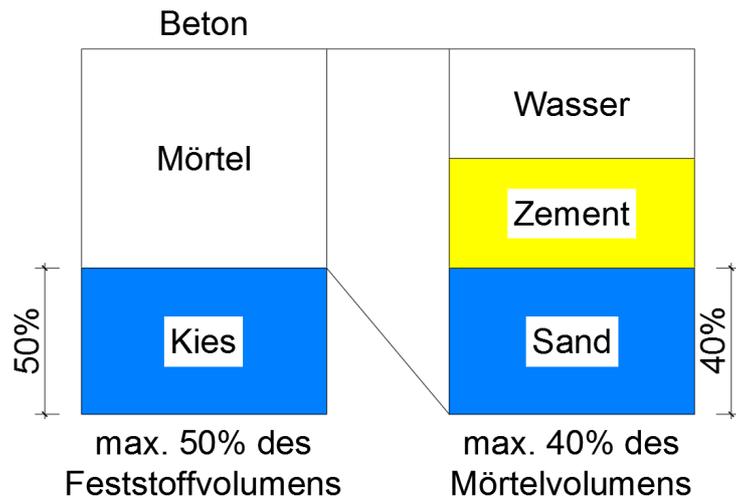


Abbildung 2.16: Schema der SCC-Zusammensetzung, Inhalt aus [11]

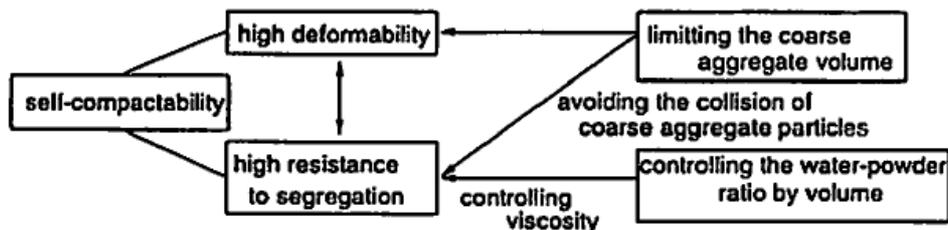


Abbildung 2.17: Zusammenhänge für SCC [12]

Da sich im Vergleich zu Normalbeton deutlich weniger Gesteinskörnung im Beton befindet, haben diese Körner einen größeren Abstand zueinander. Beim Fließen des Betons stoßen diese so gut wie nicht mehr aneinander, wodurch die Verformbarkeit des Frischbetons erhöht wird. Somit kann eine ausreichende Selbstverdichtung selbst bei komplizierten geometrischen Formen gewährleistet werden. Damit sich die Zuschläge während und nach dem Fließvorgang nicht absetzen, wird eine hohe plastische Viskosität benötigt. Diese gewährleistet dass die relative Verschiebung zwischen Zuschlag und Zementleim klein und somit die Masse homogen bleibt. Die festen Bestandteile des Mörtels, sowie das Feinheitsmodul der groben Gesteinskörnung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Passierbarkeit von Hindernissen. [1]

Verformbarkeit und plastische Viskosität sind zwei wesentliche Größen des SCC. Die Verformbarkeit kann durch das Fließmaß, die plastische Viskosität durch den V-Trichter-Test abgeschätzt werden. Okamura schlug dafür folgenden Zusammenhang vor:

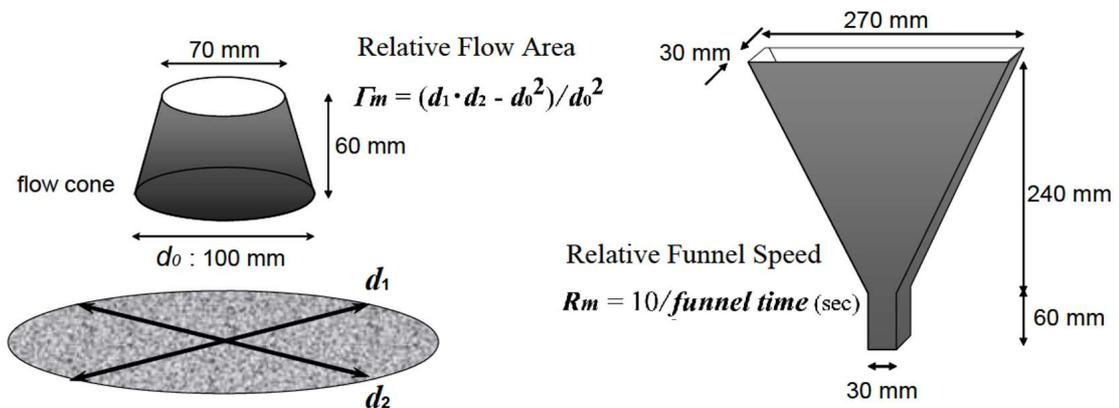


Abbildung 2.18: Fließmaß zur Bestimmung der Verformbarkeit und V-Trichter-Test zur Bestimmung der Viskosität [1]

$$\Gamma m = \frac{F^2 - F_0^2}{F_0^2} \quad (2.1)$$

Γm relatives Setzfließmaß

F Ausbreitfläche des Frischbetons, entspricht $d_1 \times d_2$ (cm²)

F_0 Aufstandsfläche des Konuses (cm²)

$$R_m = \frac{10}{\text{funnel time}} \quad (2.2)$$

R_m relative V-Trichter-Geschwindigkeit

funnel time Trichterauslaufzeit (s)

Dabei bedeutet ein höheres relatives Setzfließmaß Γm eine größere Verformbarkeit, also eine niedrigere Fließgrenze, während eine kleinere relative V-Trichter-Geschwindigkeit R_m eine größere plastische Viskosität bedeutet. [1]

Bezeichnung	Menge	Einheit
Zement	400	kg/m ³
Flugasche	100	kg/m ³
Wasser	170	kg/m ³
Sand	717	kg/m ³
Kies	907	kg/m ³
Fließmittel	11,0	kg/m ³
Luftporenbildner	0,9	kg/m ³
Stabilisierer	0,8	kg/m ³

Tabelle 2.3: Typische Mischung Mixdesign nach Okamura [13]

Eine typische Mischung nach dem Mixdesign nach Okamura ist in Tabelle 2.3 dargestellt. Diese wurde 1993 für die Errichtung der 60m hohen Pylone der Kiba Park Bridge in Japan verwendet. Dabei wurden 650 m^3 des selbstverdichtenden Betons verwendet, der die permanente Schalung aus Betonfertigteilen ausfüllte. Im Vergleich zu konventionell vibriertem Beton konnten somit die erforderlichen Arbeiter bei der Betoneinbringung von sechs auf zwei reduziert werden, gleichzeitig wurde die Einbauzeit auf die Hälfte reduziert und möglichen Betonschäden aufgrund mangelnder Verdichtung vorgebeugt. Die Mischung weist einen Bindemittelgehalt von 500 kg/m^3 auf, auffallend ist außerdem der hohe Fließmittelgehalt von 11 kg/m^3 . [13]

2.2.2 Mixdesign nach Wallevik/Island

In Island wird der selbstverdichtende Beton mit dem niedrigsten Zement- und Mehlkornanteil verwendet. Dadurch sind seine Umweltauswirkungen geringer als jene des herkömmlichen SCCs, speziell die durch die Portlandzementproduktion verursachten Treibhausgasemissionen (oder GWP, global warming potential in $\text{kg CO}_2/\text{m}^3$ Beton) und der Primärenergieverbrauch (in MJ/m^3 Beton), weshalb er als Eco-SCC bezeichnet wird. Der Beton weist eine hohe Fließgrenze und eine niedrige plastische Viskosität auf. Seine Stabilität gegen Absetzen erreicht der Eco-SCC durch seine Kornverteilung, Mikrosilika und die Zugabe von Stabilisierer. Er weist einen Mehlkornanteil von unter 315 kg/m^3 , viel mittlere Gesteinsfraktion und wenig grobe Gesteinskörnung auf. Laut theoretischem Modell sollte das Volumen einer Körnungsklasse immer mindestens gleich groß sein bzw. das der nächst größeren übersteigen. Der durch diese Kornverteilung erzielte Effekt wird als Gittereffekt bezeichnet. Die daraus resultierende Kornverteilung wird in Abbildung 2.19 veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass sie im Vergleich zur „B“-Sieblinie der Önorm 4710-1 einen höheren Anteil an Sand aufweist. Außerdem ist der Anteil an sehr grober Gesteinskörnung im Vergleich geringer. Durch seine rheologischen Eigenschaften kann der Beton leicht in die Schalung eingebracht werden, seine Anfälligkeit auf Absetzen ist jedoch hoch. [9]

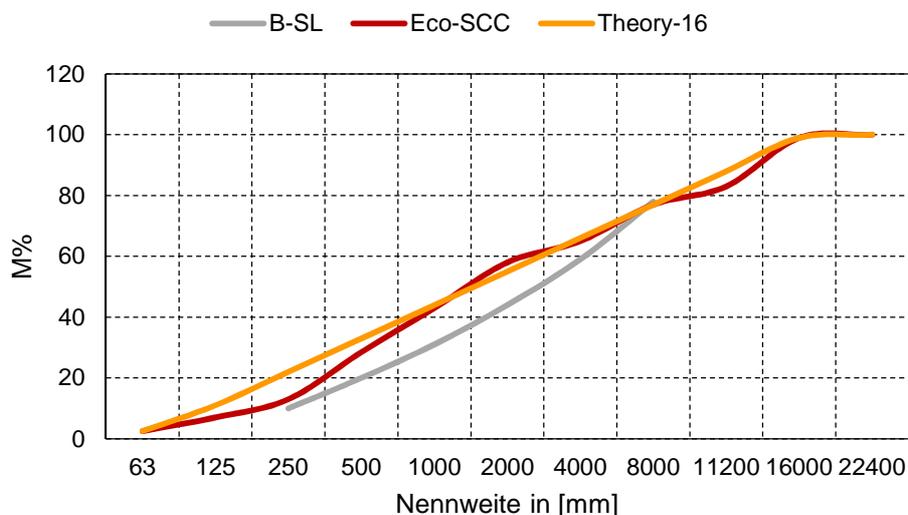


Abbildung 2.19: Kornverteilungen der isländischen Betonrezepturen [9] und der „B“-Sieblinie nach Önorm B 4710-1, GK 16 [4]

Der isländische Eco-SCC wurde für den Einsatz als Transportbeton entwickelt, der eine Druckfestigkeitsklasse C 25/30 erreicht, sodass er für viele Anwendungszwecke geeignet ist. Er wurde nicht entwickelt um hochfesten SCC zu ersetzen, der dicht verlegte Bewehrung umschließen oder lunkerfreie Oberflächen schaffen soll. [10]

Im Gegensatz zu der japanischen Rezepturentwicklung erfolgt die Erstellung der Betonrezeptur des isländischen Eco-SCC mit dem sog. rheologischen Ansatz. Dabei werden die Fließgrenze und die plastische Viskosität des Frischbetons bestimmt. Zusätzlich können Prüfungen zur Bestimmung der Passierbarkeit von Hindernissen und dem Füllen von Hohlräumen vorgenommen werden. Rezepturparameter wie z.B. Leimvolumen und Korngrößenverteilung werden solange angepasst, bis die geforderten Eigenschaften erfüllt werden. Die Fließgrenze und die plastische Viskosität werden in einem Rheograph eingetragen, wodurch auf die Frischbetoneigenschaften des Betons geschlossen werden kann. [10]

Um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen muss besonderes Augenmerk auf die Korngrößenverteilung und die Kornform gelegt werden. Auch der Mehlkornanteil sollte bei der Sieblinie beachtet werden, nicht jedoch der Zement. Neben der Größenverteilung sind auch die Form und die Oberfläche der Zuschläge von großer Bedeutung. Zement kann teilweise durch Füller wie zum Beispiel Kalksteinmehl ersetzt werden. [9]

Eine typische Mischung nach dem isländischen Konzept ist in Tabelle 2.4 dargestellt.

Bezeichnung	Menge	Einheit
Zement	302	kg/m ³
Mikrosilika	12	kg/m ³
Wasser	204	kg/m ³
Sand	925	kg/m ³
Kies	909	kg/m ³
Fließmittel	2,25	kg/m ³

Tabelle 2.4: Typische Mischung Mixdesign nach dem isländischen Konzept [14]

Die Mischung weist einen geringen Bindemittelgehalt von 302 kg/m³ auf. Die Wassermenge ist mit 204kg/m³ hoch. Dadurch ergibt sich ein w/b Wert von 0,63.

2.2.3 Mixdesign in Österreich

Das Mixdesign in Österreich und auch in Deutschland orientiert sich am Mixdesign nach Okamura. Die Betonrezepturen weisen dabei eine hohe plastische Viskosität und eine niedrige Fließgrenze auf. Um der Sedimentation und Separation vorzubeugen wird im Vergleich zu normal vibriertem Beton ein deutlich höherer Mehlkorngelhalt verwendet. Dadurch wird zusammen mit Wasser, Fließmittel und weiteren feinen Partikeln eine Suspension mit hoher plastischer Viskosität gebildet, die die Gesteinskörnung transportiert. Durch die volumenmäßige Erhöhung dieses Feinmörtels wird der Verschiebungswiderstand der Gesteinskörnung herabgesetzt und ausreichend Fließfähigkeit beibehalten. [8]

Im Folgenden werden einige Grundsätze des Mischungsentwurfs in Österreich angeführt [8]:

- Der Mehlkorngelhalt der Mischung sollte bei einem Größtkorn von 16mm mindestens 500kg/m^3 betragen
- Die Gesteinskörnung sollte sandreich sein, das Größtkorn nur in Ausnahmefällen über 16mm sein um ein Absetzen der groben Gesteinskörnung zu vermeiden
- Es ist ein Wassergehalt von 190 l/m^3 anzustreben, maximal sollten 210 l/m^3 verwendet werden
- Der Nachbehandlung ist besonderes Augenmerk zu schenken

2.2.4 Ansatz der optimierten Packungsdichte

Die Packungsdichte der festen Bestandteile des Betons hat einen wesentlichen Einfluss auf dessen Frischbetoneigenschaften. Mit dem Packungsfaktor (PF) wird das Massenverhältnis von dicht gepackten zu lose gepackten Körnungen ausgedrückt. Durch die Multiplikation der lose gepackten Körnungen mit dem Packungsfaktor wird die tatsächliche Packungsdichte im Beton repräsentiert. Je höher der Packungsfaktor, desto weniger Bindemittel ist notwendig um einen gewissen Raum zu füllen, desto geringer ist jedoch die Fließfähigkeit und Festigkeit der Mischung. Nach diesem Ansatz wird das Gewicht des Sandes (W_s) und des Kieses (W_g) errechnet. [10]

$$W_g = PF \times W_{gl} \times \left(1 - \frac{S}{a}\right) \quad (2.3)$$

$$W_s = PF \times W_{sl} \times \frac{S}{a} \quad (2.4)$$

W_g	Grobkorn im SCC (kg/m^3)
W_s	Sand im SCC (kg/m^3)
W_{gl}	lose gepacktes Grobkorn (kg/m^3)
W_{sl}	lose gepackter Sand (kg/m^3)
PF	Packungsfaktor
(S/a)	Volumenverhältnis von Sand zur gesamten Gesteinskörnung

In weiterer Folge wird der Wasser-Bindemittelwert nach gewünschten Festigkeitseigenschaften festgelegt. Um die Stabilität der Mischung zu gewährleisten wird nun Hüttensand oder Flugasche beigemischt. Somit steigt die plastische Viskosität an, auch die Fließfähigkeit kann dadurch gesteuert werden. Dieser Ansatz führt zu geringerem Mehlkornanteil als die Entwicklung der Betonrezeptur nach Okamura. Durch die Zugabe von Hüttensand oder Flugasche erhält der Beton gute Dauerhaftigkeitseigenschaften. [10]

Das Mehlkorn mit einer Größe kleiner als $125\mu\text{m}$ hat einen großen Einfluss auf die Packungsdichte und den Wasserbedarf der Betonrezeptur. Deshalb ist es sinnvoll diese Fraktion zu optimieren. Dabei sollte in Bezug auf Kosten und Umweltwirkung vor allem der Zement durch geeignete Füllstoffe ersetzt werden. Dafür können zum einen hydraulisch wirksame Zusatzstoffe wie z.B. Flugasche verwendet werden. Diese können die Dauerhaftigkeit des Betons stark verbessern, sind in Österreich jedoch lediglich begrenzt verfügbar. Zum anderen können inerte Füller wie Kalkstein, Dolomit und Quarz verwendet werden. Diese sind lokal verfügbar und haben eine geringere Umweltwirkung als Zement. Fließmittel reduzieren die Anziehungskräfte zwischen feinen Partikeln und verbessern somit die Fließfähigkeit der Mischung. Dadurch kann für eine erforderliche Fließfähigkeit das Leimvolumen reduziert werden. [15]

Füllstoffe können nach [15] anhand ihres mittleren Korndurchmessers d_{50} in Mikrofüller MF, Ecofüller EF und Makrofüller MAF eingeteilt werden. Mikrofüller haben einen mittleren Korndurchmesser d_{50} von weniger als $5\mu\text{m}$ und sind somit kleiner als Zement. Sie erhöhen die Packungsdichte und senken somit den Wasseranspruch der Rezeptur. Dieser Effekt wird in Abbildung 2.20 dargestellt. [15]

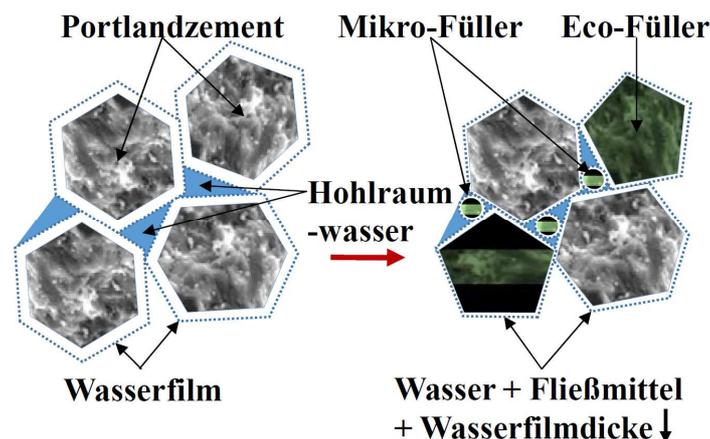


Abbildung 2.20: Effekt von Füllern und Fließmittel [16]

Um diesen Füllereffekt zu erzielen, sollte das Verhältnis $d_{\text{klein}}/d_{\text{groß}}$ für ein Zweikornmischung idealerweise kleiner als 0,15 sein. Diese Grenze variiert je nach Kornform und gewünschten Betoneigenschaften und kann deshalb in einem breiten Bereich zwischen 0,08 und 0,33 schwanken. [15]

Ecofüller sind von Vorteil wenn sie einen geringeren Wasseranspruch als Zement aufweisen, da sie dadurch den Wasseranspruch der Mischung für eine bestimmte Fließfähigkeit senken. Ihr mittlerer Korndurchmesser d_{50} ist größer als $5\mu\text{m}$ und kleiner als $30\mu\text{m}$. Füller mit einem mittleren Korndurchmesser größer als $30\mu\text{m}$ können als Makrofüller bezeichnet werden. Sie können die Korngrößenverteilung der Mischung günstig beeinflussen. [15]

Neben der Korngrößenverteilung, der spezifischen Oberfläche, der Packungsdichte und der Interaktion von sehr feinen Partikeln sind auch die Form, Oberfläche und Ladung der Partikel von großer Bedeutung, da sie den Wasseranspruch und damit die Fließeigenschaften beeinflussen. [15]

2.2.5 Ansatz der optimierten Kornverteilung

Die Rolle der Gesteinskörnung auf Beton wurde bereits für Normalbeton untersucht. Da Selbstverdichtender Beton jedoch eine andere Korngrößenverteilung benötigt, sollte sich die Gesteinskörnung von jener in Normalbeton unterscheiden.

Koehler [17] schlägt eine Kornverteilungskurve nach Fuller nach Gleichung (2.5) mit der Hochzahl 0,45 vor, wobei die Kornform und Oberfläche zu berücksichtigen sind. Dadurch wird ein sehr geringer Mehlkornanteil erreicht. Der Volumenanteil Sand zur gesamten Gesteinskörnung sollte zwischen 0,4 und 0,5 liegen. Das Volumen von Wasser und Bindemittel sollte zwischen 28% und 40% liegen, wobei der w/b Wert zwischen 0,30 und 0,45 liegen sollte. Es wird außerdem vorgeschlagen das Leimvolumen weiter zu erhöhen um die Betonrezeptur robust zu machen. Durch den geringen w/b Wert kann eine hohe plastische Viskosität erreicht werden, wodurch sich die Gesteinskörnung nicht so leicht Absetzen kann. Es braucht jedoch viel Leimvolumen um die gewünschte Fließfähigkeit zu erreichen. [10]

$$D_i = \left(\frac{d_i}{d_{max}} \right)^{0,45} \quad (2.5)$$

D_i kumulativer Anteil des Korndurchmessers d_i

D_{max} maximaler Korndurchmesser

0,45 Parameter, welcher die Kurve justiert

Professor Brouwers von der TU Twente in Dänemark [18] [19] [20] schlägt eine Dinger-Funk Verteilung nach Gleichung (2.6) vor, wobei auch die Feinteile der Gesteinskörnungen mitberücksichtigt werden. Es wurden die gleichen Anforderungen an die Fließfähigkeit gestellt wie bei SCC mit viel Mehlkorn. Dadurch wird zum Erreichen der Fließfähigkeit, der Passierbarkeit von Hindernissen und der Stabilität des Betons viel Mehlkorn benötigt. [10]

$$D_i = \frac{d_i^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \quad (2.6)$$

- D_i kumulativer Anteil des Korndurchmessers d_i
 D_{\min} minimaler Korndurchmesser
 d_{\max} maximaler Korndurchmesser
 q Parameter, welcher die Kurve justiert

2.2.6 Statistischer Ansatz

Beim statistischen Ansatz werden unter Variation einzelner Parameter und Bestandteile Messungen durchgeführt, durch die die Fließfähigkeit, die Stabilität, die selbstverdichtenden Eigenschaften und die Druckfestigkeit bestimmt werden können. Somit kann die Wichtigkeit des einzelnen Parameters für diese Betonrezeptur bestimmt werden. Ausgehend von einer bestehenden Mischung können dadurch Rezepturen mit niedrigem Bindemittelgehalt erreicht werden. [10]

2.2.7 Matrix-Modell Ansatz

Beim Matrix-Modell Ansatz wird der Beton als zwei Phasen-System gesehen. Eine Phase ist das Leimvolumen (Matrix) mit allen Bestandteilen die kleiner als $125\mu\text{m}$ sind. Alle Partikel größer als $125\mu\text{m}$ werden als zweite Phase, der Gesteinskörnung bezeichnet. Die Eigenschaften der beiden Phasen sowie deren Verhältnis zueinander bestimmen das Fließmaß. Es werden zwei Hauptparameter bestimmt, das Verhältnis des Fließwiderstandes (λ_Q) der Matrix und das Hohlraum-Modul (H_m) der Gesteinskörnung. λ_Q wird mit Hilfe eines Mörtelauslaufkonuses bestimmt, des Weiteren wird davon ausgegangen, dass dieses mit der plastischen Viskosität korreliert. Das Hohlraum-Modul setzt sich aus den Verhältnissen des Hohlraumgehaltes von lose gepackten Feststoffen zu dicht gepackten Feststoffen zusammen. Diese werden getrennt für Sand und Kies ermittelt, wobei auch die spezifische Oberfläche eine Rolle spielt. Mit einem Formelapparat kann nun auf das Fließmaß geschlossen werden. [10]

$$K_p = (n - m) \times \frac{[\tanh(2\alpha(F_p - H_m) - 1) + 1]}{2} + m \quad (2.7)$$

- K_p Verarbeitbarkeitsfunktion (Fließmaß)
 n, m Oberer und unterer Wert der Asymptote
 F_p Volumenanteil der Matrix
 H_m Hohlraum-Modul der Gesteinskörnung

$$\alpha = k_1 \times e^{-k_2 \lambda_Q} \quad (2.8)$$

α Steigungs-Koeffizient der Verarbeitbarkeitsfunktion

λ_Q Verhältnis des Fließwiderstandes

k_1, k_2 konstante Parameter

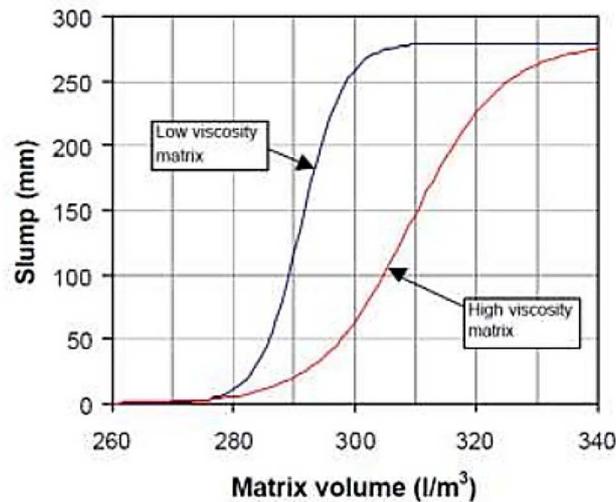


Abbildung 2.21: Zusammenhang zwischen Fließmaß und Leimvolumen mit verschiedener plastischen Viskosität [10]

In Abbildung 2.21 wird der Zusammenhang zwischen dem Fließmaß und der Viskosität der Mischung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Mischungen mit einer höheren Viskosität mehr Leimvolumen („matrix volume“) benötigen um ein gewisses Fließmaß zu erreichen. Zum Nachteil dieser Methode wurde jedoch festgestellt, dass λ_Q unsensibel auf die rheologischen Veränderungen des Betons ist. Das minimale Fließmaß wurde auf 650 mm festgelegt, welches für eine Betonmischung mit hoher plastischer Viskosität zu gering, und für eine Mischung mit geringer plastischen Viskosität bereits zu hoch sein könnte. Deshalb sollten die Fließgrenze und die plastische Viskosität immer zusammen betrachtet werden.

2.3 Beständigkeit gegen lösenden Angriff

Beton kann vereinfacht als Zweiphasensystem angesehen werden, dieses besteht aus der Gesteinskörnung und der Bindemittelmatrix, die die Gesteinskörnung ummantelt und verbindet. Lösender Angriff kann auf beide Phasen des Betons erfolgen. Vor allem durch die Kapillarporen im Zementstein und die poröse Übergangszone zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix können für den Beton schädliche Stoffe eintransportiert, sowie Bestandteile des Betons abtransportiert werden. [21]

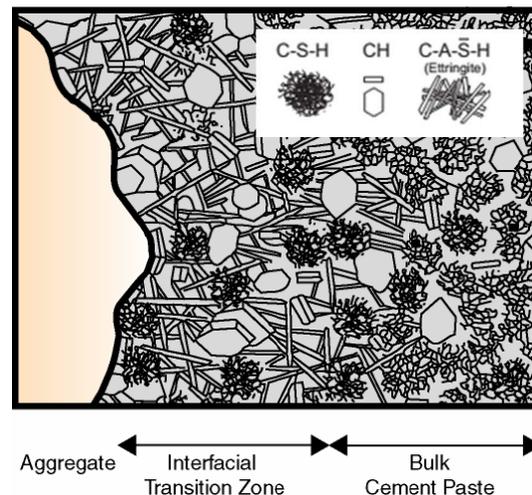


Abbildung 2.22: Übergangszone zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix [22]

In Abbildung 2.22 ist die Übergangszone zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der Übergangszone vermehrt Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) vorzufinden ist, während die festigkeitsbildenden C-S-H Phasen in dieser Zone seltener anzutreffen sind. Portlandit entsteht bei der Hydratation des Zementes. Dabei werden 15-20 M% des Zementes in Portlandit umgewandelt, das das Porenwasser zusammen mit den anderen Alkalien alkalisch macht. Dies schützt die Stahleinlagen vor Korrosion und verhindert eine weitere Zersetzung der Hydratationsprodukte, welche in einem weniger alkalischen Milieu weiter Kalk abspalten. Jeder lösende Angriff führt zu einer Störung des Gleichgewichts der alkalischen Porenlösung und somit der Hydratationsprodukte. [23] Des Weiteren ist die Gesteinskörnung von großer Bedeutung. Karbonatische Gesteinskörnung wird bei dieser Art von Einwirkung stark angegriffen. Etwas besser geeignet sind dolomitische Gesteinskörnungen, während quarzitisches Gesteinskörnungen sehr resistent sind. [21]

Besonderes Augenmerk ist der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Wechselrate des angreifenden Mediums zu schenken. Ist das Bauteil nämlich der ständigen Zufuhr von frischem Angriffsmedium ausgesetzt, intensiviert sich die Angriffswirkung. [21]

Lösender Angriff kann durch verschiedene Angriffsmechanismen erfolgen, einige sind in Abbildung 2.23 ersichtlich.

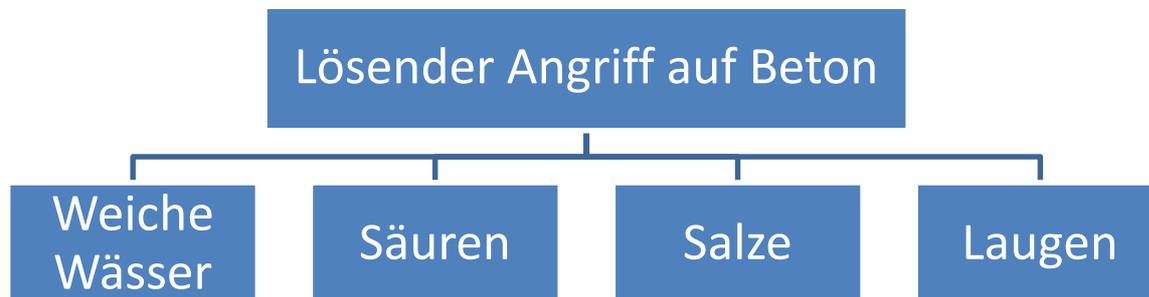


Abbildung 2.23: Übersicht lösender Angriff

Der Einsatzbereich des zu entwickelnden Betons als Trinkwasserspeicher erfordert vor allem den Widerstand gegen weiche Wässer und Säuren, auf dessen Angriffsmechanismen im Folgenden eingegangen wird.

2.3.1 Angriff durch weiche Wässer

Weiche Wässer treten meist in Regionen auf, in denen keine kalkhaltigen Gebirge vorkommen. Dies kann zum Beispiel bei Granit der Fall sein, wo das Wasser auf seiner Reise nicht in Kontakt mit Ca^{2+} - oder Mg^{2+} -Ionen kommt [24]. Weiche Wässer sind in Bezug auf die Aufnahmefähigkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ also noch nicht gesättigt. Deshalb können sie Calciumhydroxid vorwiegend aus dem Zementstein lösen und diesen zersetzen. Je härter das Wasser, je mehr es also schon Kalk gelöst hat, desto weniger $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kann es aus dem Zementstein lösen. Dies trifft auch auf die anderen alkalischen Bestandteile wie NaOH und KOH zu, diese sind im Vergleich zu Calciumhydroxid jedoch nur in geringen Mengen im Beton vorhanden. [23]

Je höher der Kalkgehalt im Zement ist, desto anfälliger ist er auf diese Art von Angriff. Dichter oder wasserundurchlässiger Beton ist besonders resistent. Mit einem w/b-Wert $< 0,45$ kann einem starken Angriff standgehalten werden [23]. Des Weiteren sind Betone, die Hüttensand oder Flugasche enthalten widerstandsfähiger gegen diese Art von Angriff. [24]

Der Angriff durch weiche Wässer wird in der Regel als gering eingestuft. Kommt das Betonbauteil im Laufe seines Lebenszyklus jedoch in Kontakt mit einer großen Menge an Wasser, kann durch stetige Auslaugung und stetigem Abtransport ausgelaugter Ionen selbst ein geringfügiger Angriff des Wassers multipliziert mit der großen Wassermenge einen erheblichen Schaden verursachen.

2.3.2 Angriff durch Säuren

Säuren wandeln die Bestandteile des Zementsteins und gegebenenfalls der Gesteinskörnung in leicht wasserlösliche Salze um, wodurch sie lösend wirken. Die Stärke des Angriffs ist von der Konzentration sowie der Stärke der Säuren abhängig. Die Kohlensäure ist mit am meisten Schadensfällen in Verbindung zu bringen. [23]

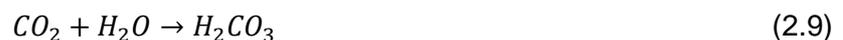
In Tabelle 2.5 werden verschiedene Säuren, deren Löslichkeit und deren pH-Wert angegeben.

Säuretyp		Löslichkeit [mol/l]	pH-Wert
Salzsäure	HCl	1	0
Essigsäure	C ₂ H ₄ O ₂	1	2,4
Milchsäure	C ₃ H ₆ O ₃	1	1,9
Kohlensäure	H ₂ CO ₃	0,001	4,8
Schwefelige Säure	H ₂ SO ₃	0,00001	3,5

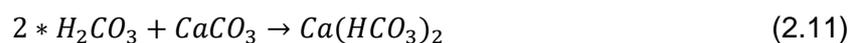
Tabelle 2.5: Übersicht verschiedener Säuren, Daten aus [25]

2.3.2.1 Angriff durch kalkaggressive Kohlensäure

Beim dieser Art von Angriff reagiert zunächst das Kohlendioxid mit Wasser und bildet Kohlensäure.



Die Kohlensäure löst das Calciumhydroxid aus dem Zementstein, woraus das in Wasser schwer lösliche Calciumcarbonat entsteht. Anschließend formen Kohlensäure und Calciumcarbonat das in Wasser leicht lösliche Calciumhydrogencarbonat. [24]



Kohlensäure kann in Wasser in drei verschiedenen Formen vorkommen, als freie Kohlensäure, als halbgebundene Kohlensäure und als gebundene Kohlensäure. [23]

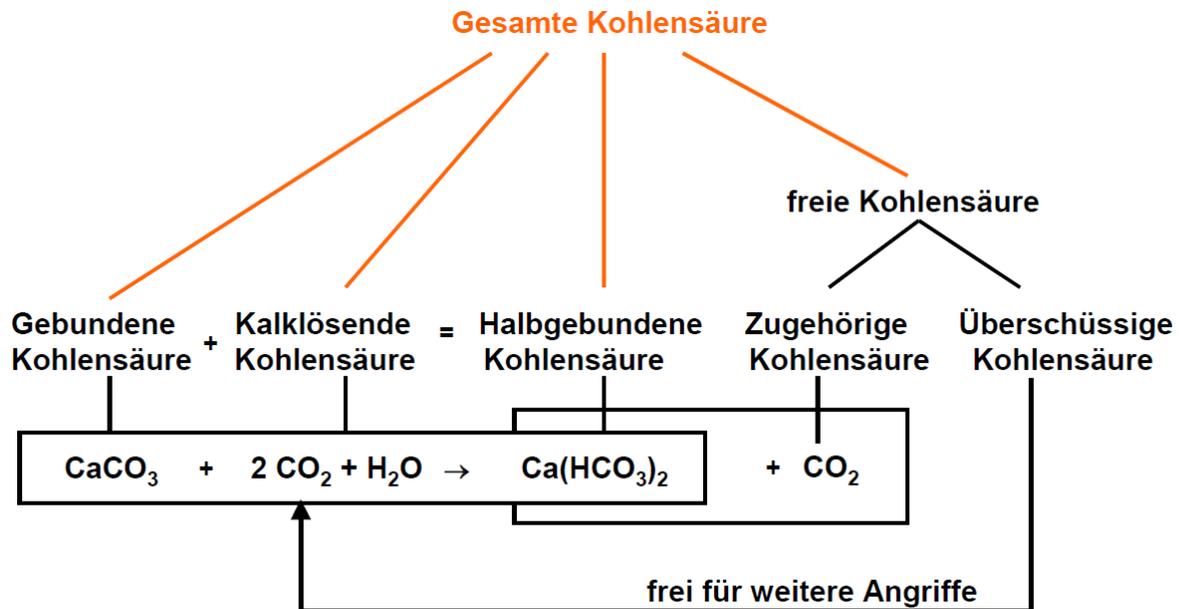


Abbildung 2.24: Formen der Kohlensäure [25]

Die Bestandteile des gelösten Calciumhydrogenkarbonats liegen als Ca^{2+} - und HCO_3^- - Ionen vor und benötigen freie Kohlensäure im Wasser um in dieser Form zu erscheinen. Diese freie Kohlensäure wird als zugehörige Kohlensäure bezeichnet und greift den Zementstein nicht an. Je mehr Ca^{2+} - und HCO_3^- - Ionen im Wasser gelöst sind, desto härter ist die Wasserhärte. Kalkhaltiges Wasser kann viel Kohlensäure enthalten ohne aggressiv zu wirken. [23] Je weicher das Wasser, desto aggressiver verhält es sich gegenüber dem Zementstein, da das CO_2 dabei in freier und nicht zugehöriger Form vorliegt (CO_2 und H_2CO_3). Bei hartem Wasser ist das CO_2 bereits zugehörig oder gebunden (HCO_3^-), sodass es keinen Reaktionspartner aus dem Zementstein benötigt. [26]

3 Ausgangsstoffe und deren Einfluss

Die Wahl der Ausgangsstoffe wurde in Absprache mit einem Industriepartner getroffen. Dabei spielen die lokale Verfügbarkeit und der ökonomische Aspekt eine wesentliche Rolle. Die verwendeten Ausgangsmaterialien werden im Folgenden beschrieben.

3.1 Wasser

Wasser beeinflusst die Eigenschaften des Frischbetons maßgeblich. Ein Teil des Wassers wird von den Feststoffen gebunden. Der nichtgebundene Teil des Wassers wird als freies Wasser bezeichnet. Mehr freies Wasser erhöht die Verformbarkeit und senkt die Viskosität. [12]

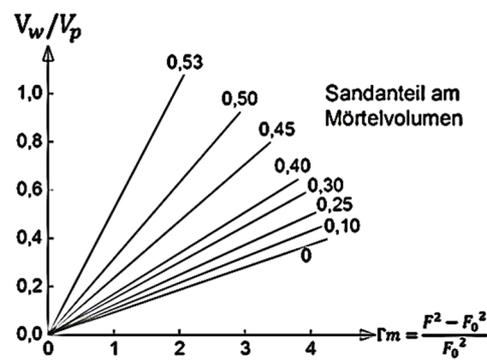


Abbildung 3.1: Beziehung zwischen freiem Wasser zu Sandanteil und Fließfläche, Inhalt aus [12]

In Abbildung 3.1 ist zu erkennen, dass durch mehr Wasser die relative Fließfläche proportional zunimmt. Das bedeutet, dass die Fließgrenze abnimmt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass durch einen erhöhten Sandanteil im Mörtel die Fließgrenze zunimmt. Die relative Fließfläche errechnet sich dabei nach Gleichung (2.1) des Kapitels 2.2.1.

3.2 Zement

Um selbstverdichtenden Beton herzustellen kann in der Regel herkömmlicher Zement verwendet werden. Die gewünschten rheologischen Eigenschaften werden dabei durch die Zugabemenge gesteuert. Zement hat einen wesentlichen Einfluss auf frischen, erhärtenden und harten Beton. Dieser ist in nachfolgender Auflistung ersichtlich. [10]

Frischer Beton:

- Der Zementgehalt im Beton ist wichtig für dessen Fließfähigkeit und deren zeitliche Veränderung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Zement einen geringen Korndurchmesser im Vergleich zu den meisten anderen Bestandteilen im Beton aufweist. Dadurch ist er Teil des Mehlkorns, welches für die Fließigenschaften des Betons von großer Bedeutung ist. Durch das Abbinden des Betons wird die Fließfähigkeit mit fortlaufender Zeit beeinträchtigt. Umso kleiner die Zementpartikel

sind, desto schneller findet die Hydratation statt, da mehr Oberfläche für die Reaktion zur Verfügung steht.

- Die Interaktion des Fließmittels FM mit Zementen ist sehr vielfältig. Fließmittelmoleküle werden adsorbiert, es finden FM mit hoher Anfangswirkung und geringer Konsistenzhaltung sowie FM mit geringerer Anfangswirkung und besserer Konsistenzhaltung Anwendung. [27]
- Die Mischung aus Zement, anderen Feinstoffen und Wasser sollte so abgestimmt sein, dass es weder zu Bluten noch zu einem Absetzen der groben Gesteinskörnung kommt. Dieser Leim weist durch die geringe Rohdichte des Wassers eine geringere Dichte als die Zuschläge auf, wodurch deren Absetzen ermöglicht wird.
- Je mehr Zementleim sich in der Mischung befindet, desto geringer ist deren Sensibilität auf Veränderung des Mischverhältnisses.

Erhärtender Beton:

- Die Zementart sowie die Zementmenge beeinflussen die Hydratationswärme und die damit verbundene Rissbildung. Damit verbunden ist die Festigkeitsentwicklung und damit erforderliche Zeit bis zum Ausschalen.

Harter Beton

- Der Bindemittelgehalt, wobei Zement meist den größten Anteil ausmacht, und dessen Verhältnis zu Wasser bestimmt die Betonfestigkeit maßgeblich.
- Zement beeinflusst ebenfalls das Langzeitverhalten der Mikrostruktur und damit die Dauerhaftigkeit.

In dieser Arbeit wird folgender Zement verwendet:

- CEM I 42,5R C₃A frei (Zement)

Das Datenblatt dieses Zementes ist im Anhang A – Datenblätter.

Dieser Zement weist eine Mahlfineinheit von 3800 cm²/g auf (ein mittelgroßer Wert). Ebenfalls ist er frei von Tricalciumaluminat. Dadurch ist der Wasseranspruch dieses Zements gering, was ihn für die Verwendung von SCC eignet. Er erreicht eine Normfestigkeit von 56 N/mm² nach 28 Tagen. Aufgrund des Fehlens von C₃A ist die Wärmeentwicklung des erhärtenden Betons geringer, wodurch Risse vermieden und somit die Dauerhaftigkeit erhöht werden. Aufgrund stark verringerter Ettringitbildung wird dieser Zement für die Beständigkeit gegen chemischen Angriff (treibend) im Allgemeinen empfohlen.

3.3 Zusatzstoffe

Das Mehlkorn stellt den kleinsten festen Bestandteil im Beton dar. Die Auswahl und das Mischungsverhältnis des Mehlkorns sind wichtig sowohl für die Frischbeton- als auch die Festbetoneigenschaften. Je feiner die Partikel desto mehr Oberfläche pro Masse oder Volumen ist vorhanden. Dies steigert die Wasseraufnahme erheblich. Das übliche Verhältnis zwischen Wasservolumen/Mehlkornvolumen variiert für SCC in der Regel zwischen 0,7 und 1. Dieses Verhältnis hängt vor allem von dem erwünschten Fließmaß, aber auch von der

Kornverteilung, der geometrischen Form, der Oberflächenbeschaffenheit und der Reaktivität des Mehlkorns ab. [12]

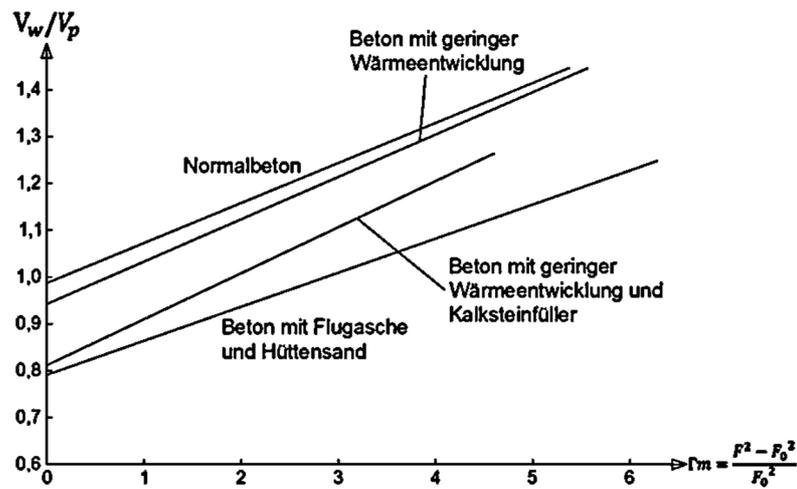


Abbildung 3.2: Verhältnis zwischen Wasser/Mehlkornanteil und relativer Fließfläche, Inhalt aus [12]

In Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 sind Zusammenhänge zwischen dem Wasser/Mehlkornanteil und der relativen Fließfläche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit mehr Mehlkornanteil im Verhältnis zu Wasser die Fließgrenze im Mörtel ansteigt, wodurch das relative Fließmaß sinkt. Ebenfalls wird verdeutlicht, dass durch Zusatzstoffe der Wasseranspruch beeinflusst werden kann. Flugasche und Hüttensand können im Vergleich zu Portlandzement mit weniger Wasser dasselbe Fließmaß erreichen.

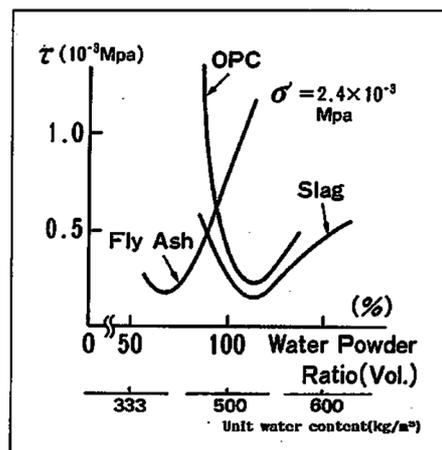


Abbildung 3.3: Zusammenhang zwischen w/b Wert und Schubspannung vom Leim [11]

3.3.1 Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe

Die folgend angeführten Zusatzstoffe unterscheiden sich in ihrer Größe, Kornverteilung, chemischen Zusammensetzung und Form voneinander. Sie sind hydraulisch wirksam, bilden also CSH-Phasen im Beton indem sie mit freiem Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und Wasser reagieren. Diese Reaktion findet deutlich langsamer als die Zementhydratation statt, wodurch sie nur wenig zur Frühfestigkeit des Betons beitragen. Durch die unterschiedliche Korngrößenverteilung (Abbildung 3.4) in Bezug zu den Zementkörnern können diese Zusatzstoffe die Mikrostruktur des Betons verdichten. Dadurch wird eindringendes Wasser zurückgehalten und somit die Dauerhaftigkeit erhöht. Die Korngrößenverteilung dieser Stoffe ist in Abbildung 3.4 dargestellt, zum Vergleich wurde auch jene von Zement hinzugefügt.

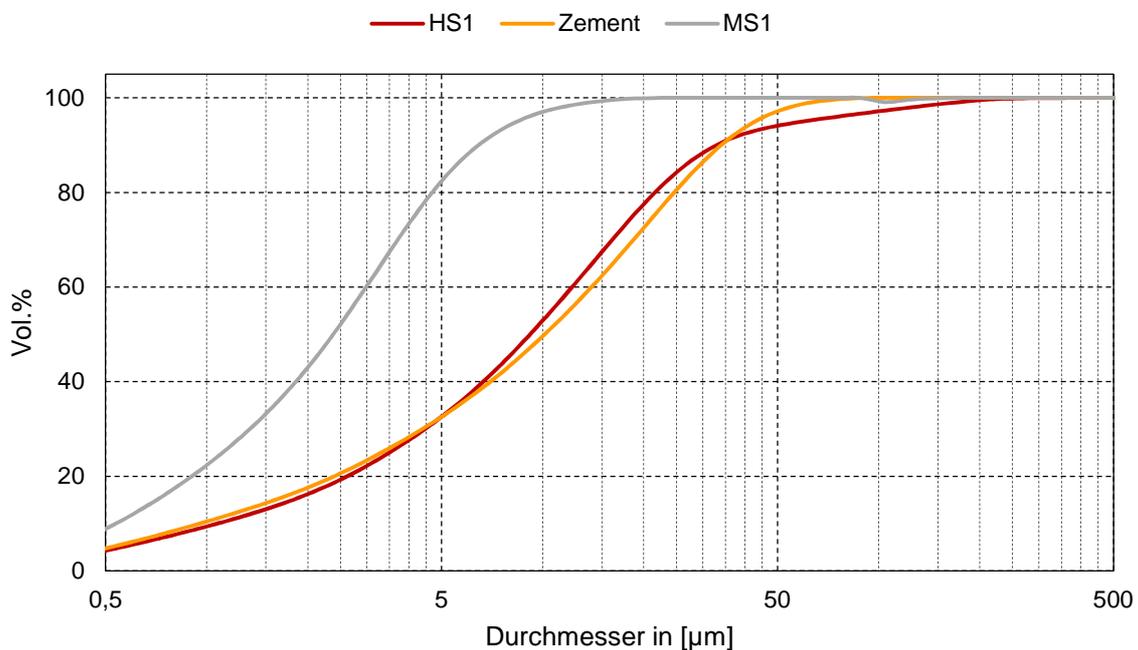


Abbildung 3.4: Kornverteilung des Zementes und der hydraulischen Zusatzstoffe

3.3.1.1 Mikrosilika

Mikrosilika ist ein Nebenprodukt bei der Herstellung von Silizium- und Ferrosilizium. Es enthält mit über 85% viel amorphes Silizium und weist eine sehr geringe Partikelgröße auf. Dadurch hat es eine hohe spezifische Oberfläche von 150.000-300.000 cm^2/g . Es kann zwischen kompaktierten und unkompaktierten Mikrosilika unterschieden werden. Unkompaktiertes Mikrosilika wird durch einen Kristallisationsprozess hergestellt. Die chemische Zusammensetzung der beiden Arten unterscheidet sich jedoch kaum, wodurch sich auch die rheologischen Eigenschaften der beiden Mikrosilika kaum unterscheiden. [10]

Durch das Mikrosilika wird die Porosität des Betons herabgesetzt. Besonders die Kontaktzone zwischen Zement, Leim und Gesteinskörnung wird gestärkt, was zur deutlichen Erhöhung der Betonfestigkeit führt. Wenn Mikrosilika weniger als 10% der Zementmasse ausmacht, bilden

sich die CSH Phasen innerhalb einiger Wochen. Sie verbessern die Undurchlässigkeit des Betons deutlich. Um die gewünschten Eigenschaften zu erzielen muss sichergestellt werden, dass das Mikrosilika gut verteilt ist. [10]

Bis zu einer relativen Zugabemenge von ca. 8% der Zementmasse wird die plastische Viskosität bei relativ gleich bleibender Fließgrenze reduziert. Erhöht man den Anteil an Mikrosilika weiter, wird die Fließgrenze deutlich erhöht. Dies ist auf das hohe Absorptionsverhalten der kleinen Partikel zurückzuführen. [10]

In dieser Arbeit werden folgende Mikrosilika verwendet:

- MS1: In der Form von Slurry, 50 M.-%Wasser und 50 M.-% Mikrosilika

Die Datenblätter dieses Mikrosilika sind im Anhang A – Datenblätter.

3.3.1.2 Flugasche

Flugasche wurde bei den Laborversuchen dieser Masterarbeit nicht verwendet, wird hier jedoch beschrieben, da sie für SCC breite Anwendung findet. Flugasche wird schon lange als Füller für Beton verwendet, um dessen Dauerhaftigkeit zu erhöhen. Da am Beginn der Zementreaktion wenig freies Ca(OH)_2 zur Verfügung steht, wirkt die Flugasche hierbei hauptsächlich als Füller. Die puzzolanischen Eigenschaften werden erst mit voranschreitendem Betonalter deutlich, wenn der pH-Wert höher ist. Wird über 10% Mikrosilika verwendet, kann zu wenig CH Gehalt vorliegen, wodurch die Reaktion der Flugasche verlangsamt oder im Extremfall gestoppt wird. [10]

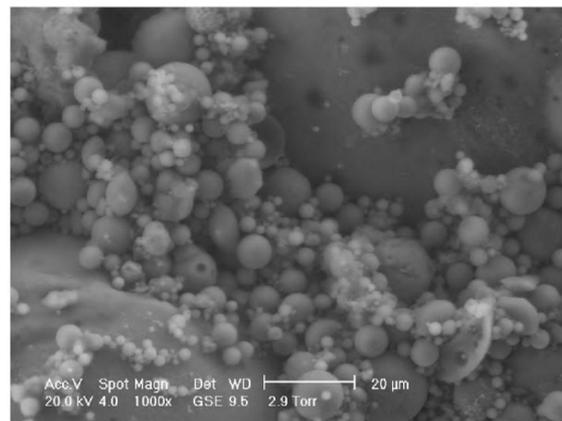


Abbildung 3.5: Steinkohlenflugasche unter dem Elektronenmikroskop [28]

Runde Flugasche senkt die Fließgrenze und die plastische Viskosität des Frischbetons. Da Flugasche ein Rückstand aus Kohlekraftwerken ist, können ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften (Abbildung 3.6) stark variieren. Dies kann zu Variationen der Frisch- und Festbetoneigenschaften führen. Des Weiteren können Rückstände wie Kohlenstoff zu einem erhöhten Wasseranspruch und zu Wechselwirkungen mit Zusatzmitteln führen. [10]

Table 2-5: Examples of main chemical composites in fly ashes

Chemistry	Class C fly ash, USA [126]	Class F fly ash, USA [126]	Fly ash, Germany [324]	Fly ash, Norway [232]	Fly ash, DK [project]
SiO ₂	35.70	46.70	47	51.4	50.45
CaO	17.32	7.00	4	7.22	5.78
Fe ₂ O ₃	5.76	8.40	12	6.84	5.48
Al ₂ O ₃	20.30	25.0	27	24.9	25.19
LOI (<5%)	0.36	2.92	<5	4.47	2.20

Abbildung 3.6: Beispiele verschiedener chemischer Zusammensetzungen von Flugasche [10]

3.3.1.3 Hüttensand

Hüttensand ist ein latent hydraulischer Zusatzstoff. Latent hydraulische Zusatzstoffe verfügen über hydraulische Eigenschaften, benötigen jedoch einen Anreger wie Portlandit um zusammen mit Wasser reagieren zu können. Die Herstellung von Hüttensand erfolgt durch die Granulierung von Hochofenschlacke, die bei der Roheisenherstellung anfällt. Die Schlacke wird auf unter 800° C abgekühlt und anschließend gemahlen, damit sie in der Betonindustrie eingesetzt werden kann. Durch die rasche Abkühlung bleibt die Schlacke amorph, wodurch die Reaktivität von Hüttensand zu erklären ist. Die Hauptbestandteile von Hüttensand sind CaO, SiO₂ und Al₂O₃, was ähnlich der Zusammensetzung von Portlandzement ist. [29]

In dieser Arbeit wird folgender Hüttensand verwendet:

- Hüs1

3.3.2 Inerte Zusatzstoffe bzw. Füllstoffe

Gebräuchliche inerte Füllstoffe sind Kalkstein, Dolomit, Tuff und Quarz. [10] Da in der vorliegenden Arbeit die Beständigkeit gegen lösenden Angriff eine wesentliche Rolle spielt, sind nicht nur die rheologischen Eigenschaften der Füllstoffe zu beachten, sondern auch deren Beständigkeit gegen lösenden Angriff. Diese Gesteinsmehle sind relativ kostengünstig und in Österreich in großen Mengen verfügbar. Sie sind in definierten Kornverteilungen verfügbar, die durch den Herstellungsprozess gut kontrolliert werden können. Außerdem sind sie in höherer Feinheit als Zement erhältlich. [15]

Die Korngrößenverteilung der inerten Zusatzstoffe wird in Abbildung 3.7 veranschaulicht.

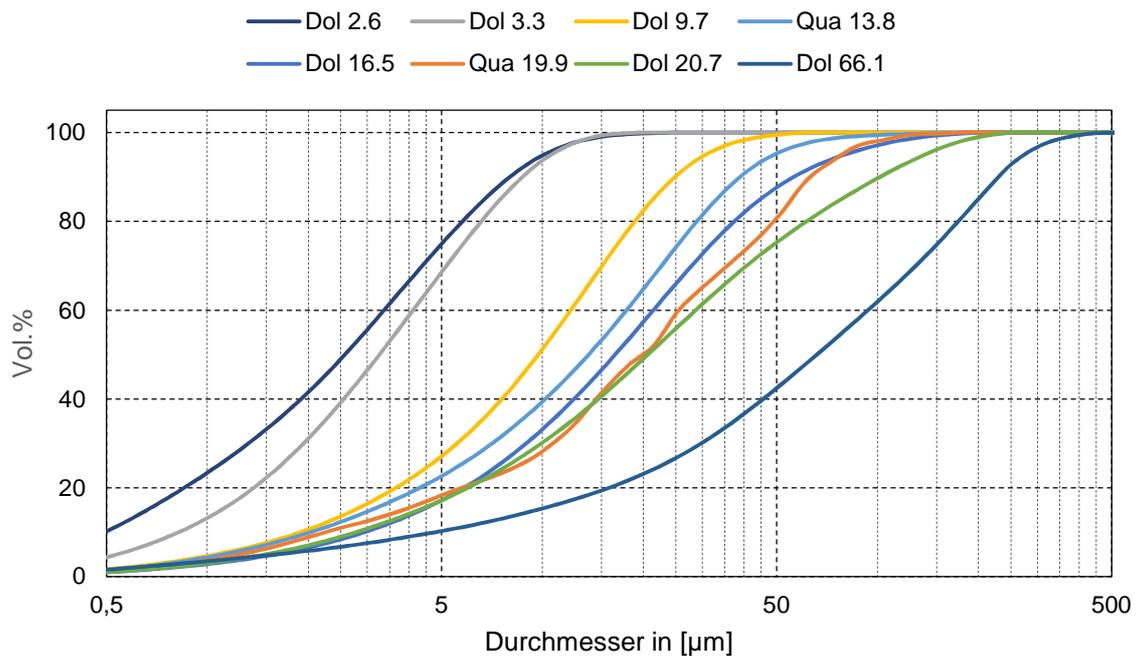


Abbildung 3.7: Korngrößenverteilung der Dolomit- und Quarzmehle

3.3.2.1 Dolomit- und Quarzmehl

Dolomitmehl besteht hauptsächlich aus dem Mineral Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ und verfügt über eine Rohdichte von 2850-2950 kg/m^3 [30]. Quarzmehl hat eine Rohdichte von 2650 kg/m^3 [30] und besteht zum Großteil aus SiO_2 , seine Kornform ist jener von Zement ähnlich. Diese ist in Abbildung 3.8 dargestellt. [28]

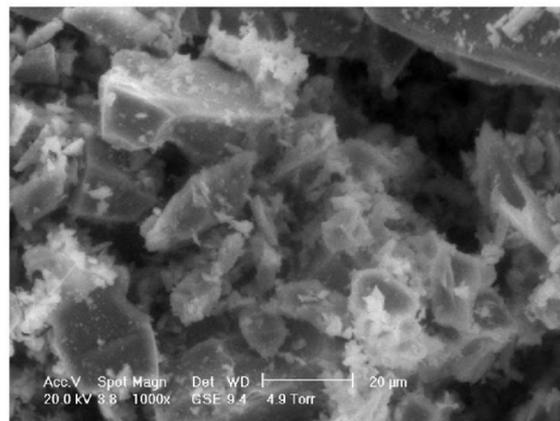


Abbildung 3.8: Quarzmehl unter dem Elektronenmikroskop [28]

Für dieser Arbeit standen folgende Dolomit- und Quarzmehle zur Verfügung:

- Dol 2.6
- Dol 3.3
- Dol 9.7

- Dol 16.5
- Dol 20.7
- Dol 66.1
- Qua 13.8
- Qua 19.9

3.3.2.2 Kalksteinmehl

Kalksteinmehl wird in der Regel als inerter Zusatzstoff bezeichnet. Es wurde oftmals festgestellt, dass Kalksteinmehl durch seine Reaktion mit Stoffen des Zementleims zu einer Erhöhung der Frühfestigkeit beitragen kann. Diese Wirkung ist umso größer, je feiner das Kalksteinmehl ist. [31]

In dieser Arbeit wird folgendes Kalkmehl verwendet:

- Kal 1.0

3.4 Gesteinskörnung

Die Zuschläge sind ein dauerhafter und starker Bestandteil von Beton. Das Verhältnis zwischen Zement, feiner und grober Gesteinskörnung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften und die Festigkeitsentwicklung von Beton. Ein volumetrisches Verhältnis von 1:1,5:1,5 ist laut Okamura/Ozawa anzustreben, was in Abbildung 3.9 veranschaulicht wird. [12]

	squeezed				1m ³
maximum-strength concrete	W 191 l	C 201 l	S 201 l	G 402 l	
	0.98 : 1 : 1 : 2				
self-compacting concrete	W 189 l	C 223 l	S 274 l	G 314 l	1m ³
maximum-strength concrete	squeeze				1m ³
	W 196 l	C 201 l	S 302 l	G 302 l	
	0.98 : 1 : 1.5 : 1.5				

Abbildung 3.9: Verhältnis der Bestandteile von Beton [12]

Die Gesteinskörnung wird durch den Bindemittelleim zusammengehalten. Die Abstufung und Form der Gesteinskörnung bestimmt die Packungsdichte und damit den erforderlichen Bindemittelleim, um gewisse rheologische Eigenschaften zu erreichen. Im Allgemeinen bildet gebrochene Gesteinskörnung gegenüber natürlicher Gesteinskörnung mehr Hohlraumvolumen, wodurch mehr Bindemittel erforderlich wird. [10]

Feine Zuschläge über 90µm benötigen über einem gewissen Anteil sehr viel Wasser. Dies ist auf das gegenseitige aneinanderstoßen gleichartiger Partikel zurückzuführen (interlock), wodurch größerer Hohlraum entsteht, welcher mit Wasser gefüllt werden muss. [12]

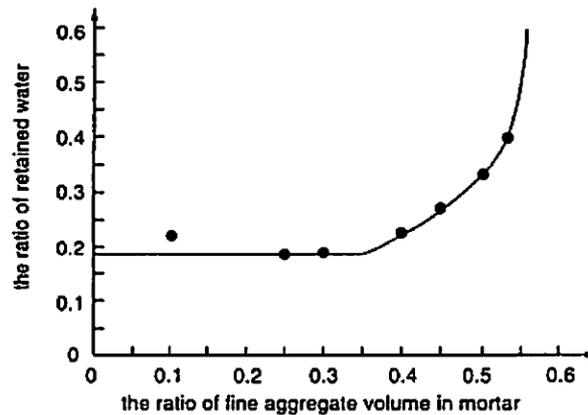


Abbildung 3.10: Wasseraufnahme des Leims in Bezug auf dessen Feststoffanteil [12]

In Abbildung 3.10 ist zu erkennen, dass es einen kritischen Sandanteil im Beton gibt. Überschreitet man diesen, steigt der Wasseranspruch deutlich an. Dieses Phänomen ist bei Mehlkorn $<90\mu\text{m}$ nicht festzustellen. Die zulässige Menge wird dabei vom Leim, nicht vom Zuschlag bestimmt. Grobe Gesteinskörnung bindet im Vergleich viel weniger Wasser. [12]

In dieser Arbeit werden folgende Gesteinskörnungen verwendet:

- S 0/2
- S 0/4
- G 4/16

Deren Korngrößenverteilung ist in Abbildung 3.11 ersichtlich.

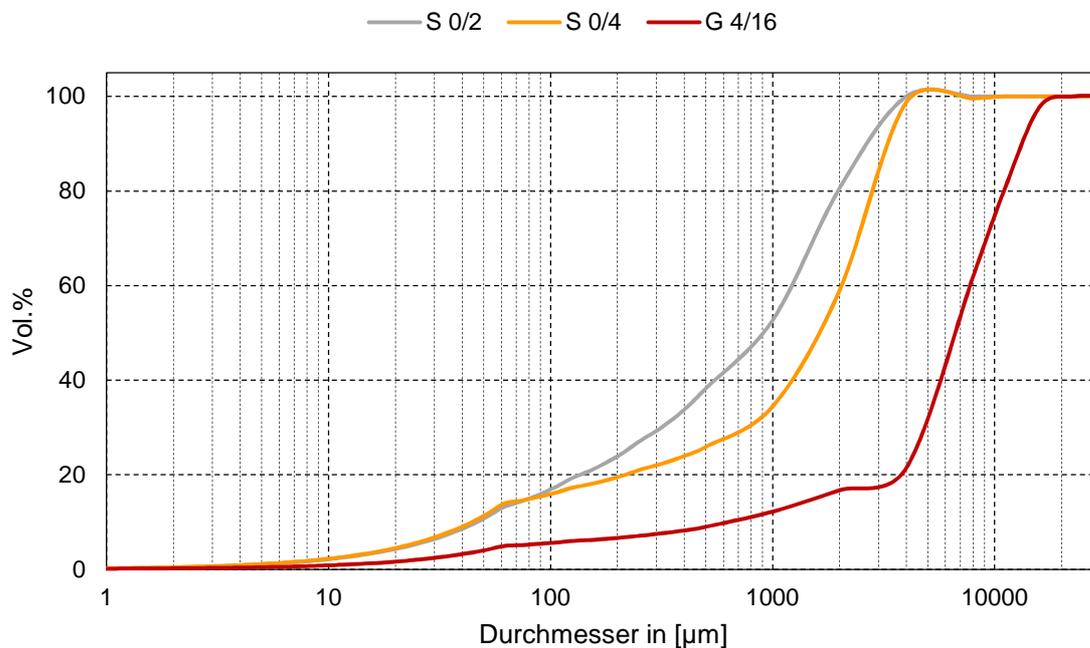


Abbildung 3.11: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen

3.5 Zusatzmittel

3.5.1 Fließmittel

Im Frischbeton neigen kleine Partikel zur Bildung von Agglomeraten. Durch die Dispersion dieser Feinstoffe kann trotz gleichbleibendem w/b-Wert die Fließfähigkeit erhöht werden. Die beste Dispergierungsfähigkeit weisen Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether auf. Diese PCE-Fließmittel verfügen zusätzlich über konsistenzhaltende Eigenschaften, da sie auch erste Hydratationsprodukte dispergieren. [10]

Es sind verschiedenste Fließmittel erhältlich, welche je nach Anwendungsgebiet verwendet werden können. Die PCE-Phasen adsorbieren an den Zementoberflächen und den Hydratationsphasen. Diese Adsorption bestimmt die Effizienz und das zeitliche Verhalten der Fließmittel. Eine stärkere Adsorptionsneigung durch eine hohe Ladungsdichte erhöht die Fließfähigkeit anfänglich stark, sorgt jedoch für keine gute Konsistenzhaltung, da neu gebildeten Hydratationsphasen kein Fließmittel mehr zur Verfügung steht. Eine geringere Ladungsdichte sorgt für eine geringere Adsorptionsneigung und somit eine geringe Reduktion der Fließgrenze. Neuen Hydratationsprodukten steht jedoch noch Fließmittel zur Verfügung, wodurch eine gute Konsistenzhaltung erreicht werden kann. [27]

Abbildung 3.12 links veranschaulicht den Einfluss der Fließmitteldosierung auf das Fließmaß und den V-Tunnel Test für verschiedene Verhältnisse von Wasser zu Mehlkornanteil. Das Verhältnis Wasser/Mehlkornanteil beeinflusst die Rheologie des Frischbetons maßgebend. Die rechte Abbildung zeigt, dass verschiedene Materialien unterschiedlich auf eine gewisse Fließmitteldosierung reagieren. [1]

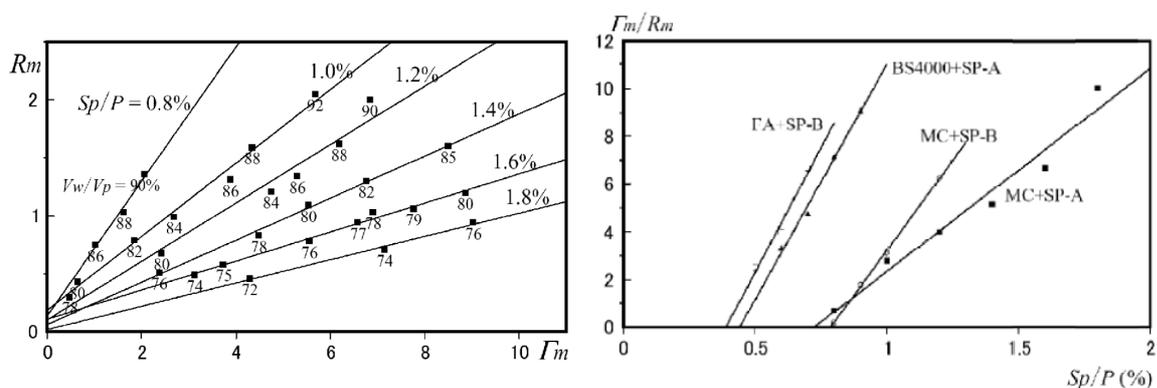


Abbildung 3.12: Einfluss des Fließmittels auf den Frischbeton [1]

Fließmittel erhöhen wie in Abbildung 3.13 ersichtlich die Verformbarkeit des Frischbetons ohne dabei die Viskosität zu reduzieren. Dadurch kann sich im Gegensatz zu Wasser die grobe Gesteinskörnung nicht so einfach absetzen. Ebenfalls wird durch die gesteigerte Verformbarkeit das Bluten nicht gefördert. [12]

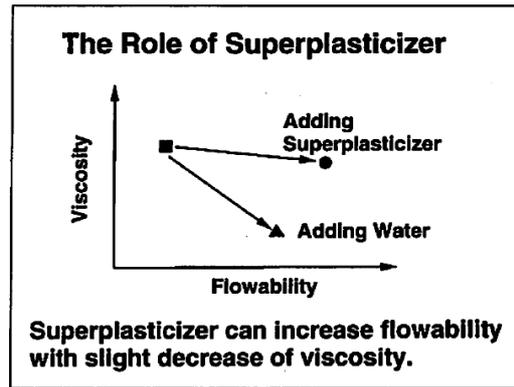


Abbildung 3.13: Effekt von Fließmittel [12]

In dieser Arbeit wurde folgendes Fließmittel verwendet:

- FM1

Das Datenblatt dieses Fließmittels ist im Anhang A – Datenblätter.
Die empfohlene Dosierung liegt bei 0,3 – 1% vom Zementgehalt.

3.5.2 Konsistenzhalter

Durch die Zugabe eines Konsistenzhalters zum Frischbeton kann die Verarbeitungszeit verlängert werden. Er sollte auf das verwendete Fließmittel abgestimmt sein.

In der Masterarbeit wurde folgender Konsistenzhalter verwendet:

- KH1

Das Datenblatt dieses Konsistenzhalters ist im Anhang A – Datenblätter.
Die empfohlene Dosierung liegt bei 0,1 – 1,5% vom Bindemittelgewicht.

3.5.3 Entlüfter

Der Entlüfter dient dazu, den Luftporengehalt des Betons zu senken. Durch einen niedrigen Luftporengehalt kann eine Lunker-freie Betonoberfläche hergestellt werden.

In dieser Arbeit wurde folgender Entlüfter verwendet:

- E1

Das Datenblatt dieses Entlüfters ist im Anhang A – Datenblätter.
Die empfohlene Dosierung liegt bei 0,75-1,00 kg/m³ Frischbeton.

4 Entwicklung der Betonrezeptur mit besonderen Anforderungen

4.1 Anforderungen

4.1.1 Geforderte Frischbetoneigenschaften

- Fließfähigkeit

Das Fließmaß ist eine wesentliche Kenngröße des frischen SCC, die Aufschluss über die Konsistenz des Betons gibt. Je nach Einsatzgebiet sind verschiedene Anforderungen an die Fließfähigkeit gestellt. Wird der Beton für Wände oder andere vertikale Bauteile verwendet, kann ein geringeres Fließmaß ausreichend sein, um den Beton zu verteilen. Hier sollte hauptsächlich die Sedimentationsstabilität gewährleistet werden. Diese ist bei geringerem Fließmaß höher, da bei solchen Betonen die Fließgrenze höher ist, was eine Verschiebung der Gesteinskörnung im Leim erschwert. Ist im Gegensatz dazu die Fließfähigkeit vom Beton von zentraler Bedeutung, wie es bei horizontalen, komplexen oder Bauteilen mit sehr dichter Bewehrung der Fall ist, sollte ein höheres Fließmaß gewährleistet werden. In Tabelle 4.1 ist das erforderliche Fließmaß laut ÖBV Richtlinie für SCC dargestellt, welches für ein Größtkorn von 16mm und üblichen Bewehrungsgehalten und Schalungsgeometrien gilt.

Type	Fließmaß [cm]	Bauteile (beispielhaft)
SCC1	58 – 70 ¹⁾	Vertikale Bauteile, Wände
SCC2	65 – 75 ¹⁾	Horizontale Bauteile, Decken, Bauteile mit komplexen geometrischen Formen, Bauteile mit sehr dichter Bewehrung, Stützen

Tabelle 4.1: Erforderliches Fließmaß laut ÖBV Richtlinie für SCC [8]

- Plastische Viskosität

Die plastische Viskosität muss stets im Zusammenhang mit dem Fließmaß betrachtet werden und kann mit Hilfe der T_{500} -Zeit abgeschätzt werden. Der V-Trichter-Test ist zum Abschätzen der plastischen Viskosität von SCC besser geeignet, da dieser Test langsamer abläuft und somit genauer gearbeitet werden kann. Er ist jedoch mit einem größeren Aufwand verbunden, da die T_{500} -Zeit bei der Ermittlung des Fließmaßes mitbestimmt werden kann. Die plastische Viskosität sollte so hoch sein, dass es zu keinem Absetzen der groben Gesteinskörnung im Beton kommt.

- Sedimentationsstabilität

Diese wurde bereits bei den beiden vorherigen Frischbetonkenngrößen erwähnt und ist für die Beurteilung eines selbstverdichtenden Betons unerlässlich. Sowohl eine Erhöhung der plastischen Viskosität als auch eine Erhöhung der Fließgrenze führen zu einer Verbesserung der Sedimentationsstabilität, können die Fließfähigkeit jedoch negativ beeinflussen.

- **Verarbeitungszeit**

Um den Einbau des Selbstverdichtenden Betons gewährleisten zu können, muss eine gewisse Verarbeitungszeit zur Verfügung stehen. Da der in dieser Masterarbeit entwickelte Beton in einem Fertigteilwerk eingesetzt werden soll, kann von einer geringen Zeit von der Herstellung bis zum Einbau ausgegangen werden. Dennoch soll die Betonrezeptur eine Verarbeitungszeit von mindestens 30 Minuten ermöglichen. Um eine längere Verarbeitungszeit zu gewährleisten gibt es mehrere Ansätze. Zum einen kann durch Zusatzmittel die Verarbeitungszeit verlängert werden. Zum anderen kann sie durch Zusatzstoffe und eine geeignete Sieblinie verbessert werden. Grundsätzlich sollte man den Beton an die Grenzen seiner Stabilität bringen, wodurch ein langes Verarbeitungszeitfenster geöffnet wird [10].

4.1.2 Geforderte Festbetoneigenschaften

- **Betondruckfestigkeit**

Für den vorliegenden Einsatzbereich wird eine Betondruckfestigkeitsklasse von C 45/55 vorausgesetzt. Da sie die Bauteildicke mitbestimmt, kann durch eine höhere Druckfestigkeit der Materialaufwand für ein gegebenes Bauteil reduziert werden. Dies hat positive Auswirkungen auf den Preis und die Umweltfreundlichkeit des Bauteils.

- **Frühfestigkeit**

Durch eine Erhöhung der Frühfestigkeit können die Bauteile schneller ausgeschalt werden. Dadurch kann die Produktionsrate des Fertigteils gesteigert werden, wodurch die anfallenden Fixkosten pro Bauteil gesenkt werden können.

- **Beständigkeit gegen lösenden Angriff und Dauerhaftigkeit**

Es soll eine Betonrezeptur entwickelt werden, die sehr beständig gegen lösenden Angriff ist. Deshalb wird von einem lösenden Angriff der Expositionsklasse XA3L ausgegangen. Eine Beständigkeit gegen lösenden Angriff könnte auch mit einer niedrigeren Expositionsklasse erreicht werden, um jedoch gute Dauerhaftigkeitseigenschaften zu erreichen wurde dieser Ansatz gewählt.

- **Lunkerfreie Oberfläche**

Mit der Betonmischung soll eine gute Oberflächenqualität erreicht werden. Dies verbessert nicht nur das optische Erscheinungsbild des Bauteils, sondern sorgt auch für eine erhöhte Dauerhaftigkeit aufgrund der geringeren Angriffsfläche auf den Beton. Eine lunkerfreie Oberfläche wird vor allem durch einen geringen Luftporengehalt sowie geeignete Schalungen und Trennmittel erreicht.

- **Ökonomisch sinnvoll**

Da der Beton in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner entwickelt wird, spielt der Preis eine wesentliche Rolle. Deshalb soll der Beton preislich so attraktiv gestaltet werden, dass er in der Praxis auch tatsächlich eingesetzt werden kann.

- **Ökologisch sinnvoll**

Die Verwendung des Baustoffs Beton verursacht weltweit einen nicht zu vernachlässigenden Teil an Umweltschädigung. Bei der Entwicklung einer Betonrezeptur sollten deshalb entscheidende Parameter wie der Primärenergiebedarf in MJ/m³ und das Global Warming Potential in kgCO₂/m³ mitberücksichtigt werden.

4.2 Prüfkörper und Prüfverfahren

4.2.1 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Alle Mischungen wurden mit einem Zyklus Gleichlaufmischer hergestellt, der in Abbildung 4.1 ersichtlich ist. Es wurden Betonmengen von 30-35 Litern untersucht. Der Ablauf der Mischung erfolgte folgendermaßen:

Zeitpunkt [sec]	Dauer [sec]	Vorgang
0	0	Grobe GK, feine GK, CEM + Zusatzstoffe in den Mischer geben
0	45	Trockene Stoffe mischen
0' 45"	180	Wasser + Entlüfter zugeben und mischen
3' 45"	120	STOP, 2 Min warten
5' 45"	120	Zusatzmittel-Dosierung
7' 45"	120	Mikrosilika-Dosierung
9' 45"	-	STOP, Frischbetonprüfungen
-	90	Aufmischen für weitere Frischbetonprüfungen + Probekörperherstellung

Tabelle 4.2: Mischabfolge im Zyklus Gleichlaufmischer

Dabei wurde das Ausbreitmaß nach 10 Minuten und 30 bzw. 45 Minuten getestet. Die Prüfkörperherstellung erfolgte nach 45 Minuten.



Abbildung 4.1: Zyklus Gleichlaufmischer

Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung mit einer Plane abgedeckt, die sie bis zum Ausschalen nach einem Tag vor dem Austrocknen der Betonoberfläche schützte. Anschließend wurden die Prüfkörper bei Raumtemperatur weiter gelagert.

4.2.2 Prüfverfahren

Am Ende des Mischvorgangs wurden das Fließmaß und die T_{500} -Zeit des Frischbetons bestimmt. Diese wurden gemäß der ÖBV Richtlinie für „Selbst- und Leichtverdichtbarer Beton“ durchgeführt [8]. Dabei wird der umgekehrt aufgestellte Konus in der Mitte der Metallplatte aufgestellt. Beide sind anzufeuchten, anschließend wird Beton in den Konus gefüllt. Der Konus wird nun durch eine gleichmäßige Bewegung nach oben gehoben wobei sich der Beton auf dem Ausbreittisch ausbreitet. Es wird die Zeit gemessen bis der Frischbeton einen Durchmesser von 500mm überschreitet (T_{500} -Zeit). Außerdem wird der Durchmesser des Frischbetonkegels durch zwei aufeinander folgende, senkrecht zueinander stehende Messungen bestimmt.



Abbildung 4.2: Prüfkonus auf Metallplatte

Der Prüfkonus weist eine Höhe von 200 mm auf, umgekehrt aufgestellt einen unteren Durchmesser von 130 mm und einen oberen Durchmesser von 200 mm. Die Frischbetonrohichte und der Luftporengehalt wurden für die meisten Mischungen ebenfalls bestimmt.

Die Druckfestigkeit der Mischungen wurde nach 24 Stunden und 28 Tagen an jeweils zwei Prüfkörpern der Größe 150 mm x 150 mm x 150 mm bestimmt.



Abbildung 4.3: Aufbau Druckfestigkeitsprüfung

Um die Beständigkeit gegen lösenden Angriff zu prüfen wurde ein Probewürfel mit den Abmessungen von 150 mm x 150 mm x 150 mm in neun Prüfkörper der Größe 40 mm x 40 mm x 150 mm geschnitten. Diese wurden angelehnt an den Anhang K der ÖNORM B 4710-1: 2007 [4] auf den Widerstand gegen lösenden Angriff getestet. Die Prismen werden unter Wasser und an der Luft gewogen, daraus wird deren Rohdichte bestimmt. Anschließend werden die Prismen abgemessen. Es erfolgt eine Nullprüfung an einem Teil der Prismen anhand eines Dreipunkt-Biegeversuchs.



Abbildung 4.4: Aufbau Dreipunkt-Biegeversuch

Die restlichen Prismen werden nun für 21 Tage in ein Becken mit Wasser gegeben. Dem Becken wird 80 %ige Essigsäure beigemischt. Der pH-Wert der Lösung sinkt kurzzeitig ab und stabilisiert sich nach einigen Stunden. Der pH-Wert für die Expositionsklasse XA3L sollte zwischen 4,0 und 4,5 liegen. Nach 21 Tagen wird nun analog zu den Vergleichsprismen die Rohdichte bestimmt und der Masseverlust im Vergleich zu den Ausgangskörpern bestimmt. Anschließend werden die Prüfkörper dem Dreipunkt-Biegeversuch unterzogen, daraus wird der theoretische Querschnittsverlust anhand der Biegezugfestigkeit der Ausgangspröben bestimmt. Durch Besprühen der Bruchfläche mit 1 %iger Phenolphthaleinlösung kann der ungeschädigte Teil des Querschnitts erkannt werden.



Abbildung 4.5: Aufbau Essigsäureprüfung

4.3 Ausgangsrezeptur

Die Betonrezeptur eines Industriepartners stellt die Basis der Rezepturentwicklung dar. Sie besteht aus den in Tabelle 4.3 mengenmäßig erfassten Ausgangsstoffen.

Bezeichnung	[kg/m ³]
Zement	420
MS1	40
Dol 2.6	50
Wasser	206
FM1	4,7
S 0/2	434
S 0/4	830
G 4/16	496
w/b	0,43

Tabelle 4.3: Ausgangsrezeptur des Industriepartners

Die Korngrößenverteilung der Feststoffe ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Mischung einen hohen Sandanteil und wenig grobe Gesteinskörnung enthält.

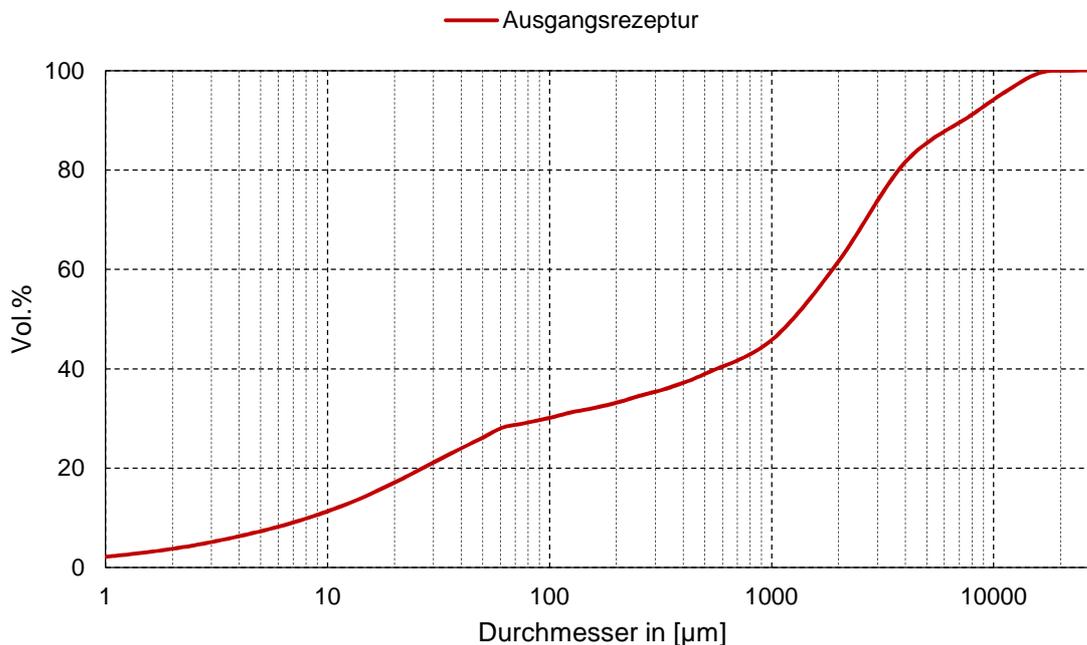


Abbildung 4.6: Korngrößenverteilung der Ausgangsrezeptur

Diese Ausgangsrezeptur wurde im Vorfeld dieser Masterarbeit untersucht. Dabei betrug das Ausbreitungsmaß nach 10 min lediglich 58 cm, was auf eine zu hohe Fließgrenze schließen ließ. Auch die Konsistenzhaltung war nicht ausreichend.

Anschließend wurde die Ausgangsrezeptur in einer Versuchsreihe durch Variation der Zusatzmittel und Kornverteilung hinsichtlich Absetzungsverhalten, Fließmaß und T₅₀₀-Zeit untersucht. Dabei wurden Volumen von 30-60l hergestellt.

In folgender Tabelle wurden die Ergebnisse dieser Versuchsreihe gegenübergestellt.

Rezept		Zeit nach Wasserzugabe	Fließmaß	Konsistenzhaltung	DF 370	ACE 331	Master Sure 911	H ₂ O
		[min]	[cm]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
2016-04-13_RB806-001	M1	10	58	0,89	0	4,7	-	198
		30	52					
		45	47					
2016-04-19_RB806-004	M1	9	73,5	0,88	0,5	4,5	-	198
		22	65					
2016-04-20_RB806-005	M3	14	73,5	0,83	0,7	4,5	-	205
		27	61					
2016-04-20_RB806-005	M4	11	72	0,90	0,7	4,5	-	205
		23	65					
2016-04-20_RB806-005	M5	14	73	0,88	0,7	4,5	-	205
		26	64,5					
2016-05-19_RB806-005	M1	10	70	0,96	0,7	4,5	2,0	198
		30	67					
2016-05-19_RB806-005	M4	10	83	0,92	0,7	5,4	3,0	198
		30	76					

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Vorversuchsreihe

Aus dieser Versuchsreihe wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Entlüfter für lunkerfreie Oberfläche notwendig
- Konsistenzhalter für ausreichend Verarbeitungszeit erforderlich
- Bei hohem Fließmittelgehalt kommt es zu starkem Bluten und Absetzen des Frischbetons, dieser Effekt vermindert sich mit fortschreitendem Frischbetonalter. Dadurch weisen die Probeprismen kein Absetzen der groben Gesteinskörnung auf

- Der Konsistenzhalter KH1 verbessert die Konsistenzhaltung in Verbindung mit dem Fließmittel FM1
- ECO-SCC nach dem isländischen Konzept weist bei ähnlichem w/b Wert sehr hohe Zähigkeit auf



Abbildung 4.7: Ausbreitungsmaß Ausgangsrezeptur (58cm)

Die Untersuchungen dieser Masterarbeit beginnen mit folgender Rezeptur, welche eine Zusatzmittelmenge von $9,1 \text{ kg/m}^3$ aufweist. Sie hat die gleiche Sieblinie wie die Ausgangsrezeptur des Industriepartners und eine Wassermenge von 198 Litern. Das Leimvolumen beträgt 453 l/m^3 , der Mehlkorngeliegt bei 751 kg/m^3 . Diese Rezeptur wird im Folgenden als Ausgangsrezeptur bezeichnet.

Bezeichnung		Ausgangsrezeptur
Zement	$[\text{kg/m}^3]$	420
MS1	$[\text{kg/m}^3]$	40
Dol 16.5	$[\text{kg/m}^3]$	50
Wasser	$[\text{kg/m}^3]$	198
FM1	$[\text{kg/m}^3]$	5,4
KH1	$[\text{kg/m}^3]$	3,0
E1	$[\text{kg/m}^3]$	0,7
S 0/2	$[\text{kg/m}^3]$	436
S 0/4	$[\text{kg/m}^3]$	842
G 4/16	$[\text{kg/m}^3]$	509
Leim	$[\text{l/m}^3]$	453
Mehlkorn	$[\text{kg/m}^3]$	751
w/b	$[\text{kg/m}^3]$	0,43

Tabelle 4.5: Ausgangsrezeptur der Masterarbeit

4.4 Schwerpunkte der Rezepturveränderung

Um die Eigenschaften der Ausgangsrezeptur anzupassen, wurden verschiedene Parameter untersucht. Dabei wurden die Empfehlungen der Österreichischen Richtlinie für Selbst- und Leichtverdichtbaren Beton, der Europäischen Richtlinie für SCC und der deutschen SVB-Richtlinie berücksichtigt. Außerdem flossen die untersuchten Mixdesigns aus Kapitel 2.2 in die Überlegungen mit ein.

4.4.1 Zusatzmittel

Die Zusatzmitteldosierung kann die Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons sehr stark beeinflussen. In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner wurden diese Zusatzmittel im Vorfeld dieser Arbeit bestimmt. Um die Mischungsrezeptur zu optimieren wurden also die Dosierungen des Fließmittels, Konsistenzhalters und Entlüfters angepasst, nicht jedoch die Produkte selbst. Um die Ausgangsrezeptur in Hinblick auf die Zusatzmittel zu untersuchen wurde eine Versuchsserie durchgeführt, dabei wurde das Verhältnis zwischen Fließmittel und Konsistenzhalter verändert. Die untersuchten Rezepturen sind in Tabelle 4.6 dargestellt.

Bezeichnung		T11	T12
Zement	[kg/m ³]	420	420
MS1	[kg/m ³]	40	40
Dol 16.5	[kg/m ³]	50	50
Wasser	[kg/m ³]	198,2	198,2
FM1	[kg/m ³]	5,4	4,0
KH1	[kg/m ³]	3,0	4,0
E1	[kg/m ³]	0,7	0,7
S 0/2	[kg/m ³]	436	436
S 0/4	[kg/m ³]	842	842
G 4/16	[kg/m ³]	509	509
w/b		0,43	0,43

Tabelle 4.6: Mischungen zur Untersuchung des Zusatzmittelverhältnisses

4.4.2 Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung

Eine geeignete Korngrößenverteilung spielt eine wesentliche Rolle für einen funktionierenden Selbstverdichtenden Beton. Deshalb wurde die Korngrößenverteilung der Ausgangsmischung analysiert und mit der empfohlenen Korngrößenverteilung nach dem Mixdesign nach Okamura verglichen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten lag die Korngröße des Sandes hierbei zwischen 90µm und 4mm (nicht wie in Österreich üblicherweise zwischen 125µm und 4mm), jene des Kieses über 4mm.

Einflussgröße	empfohlen	vorhanden
Sand/Mörtelvolumen	<40%	48%
Kies/Gesamtvolumen	<50%	18%

Tabelle 4.7: Gegenüberstellung der empfohlenen und vorhandenen Richtwerte nach Okamura

Aus diesem Vergleich, der in Tabelle 4.7 veranschaulicht ist, ging hervor, dass nach Okamura das Sandvolumen verringert und das Kiesvolumen erhöht werden sollte. Um dies zu untersuchen wurden zwei Mischungsrezepturen entwickelt, welche einen niedrigeren Sandgehalt und einen höheren Kiesgehalt aufweisen. Die Korngrößenverteilung der Ausgangsrezeptur T21 und die veränderten Korngrößenverteilung wurden in einer Versuchsserie miteinander verglichen. Die Rezepturen werden in Tabelle 4.8 dargestellt.

Bezeichnung		T21	T22	T23
Zement	[kg/m ³]	420	420	421
MS1	[kg/m ³]	40	40	40
Dol 16.5	[kg/m ³]	50	50	-
HS1	[kg/m ³]	-	-	51
Wasser	[kg/m ³]	197,8	197,7	197,3
FM1	[kg/m ³]	4,4	4,33	3,90
KH1	[kg/m ³]	-	-	-
E1	[kg/m ³]	0,7	0,7	0,7
S 0/2	[kg/m ³]	437	313	252
S 0/4	[kg/m ³]	843	603	486
G 4/16	[kg/m ³]	510	876	1057
Sand/Mörtelvolumen		48%	43%	40%
Kies/Gesamtvolumen		18%	31%	37%
w/b		0,43	0,43	0,39

Tabelle 4.8: Rezepturen zur Untersuchung der Korngrößenverteilung

Die Kornverteilungskurven dieser drei Mischungen werden in Abbildung 4.8 veranschaulicht. Der höhere Kiesgehalt ist deutlich zu erkennen.

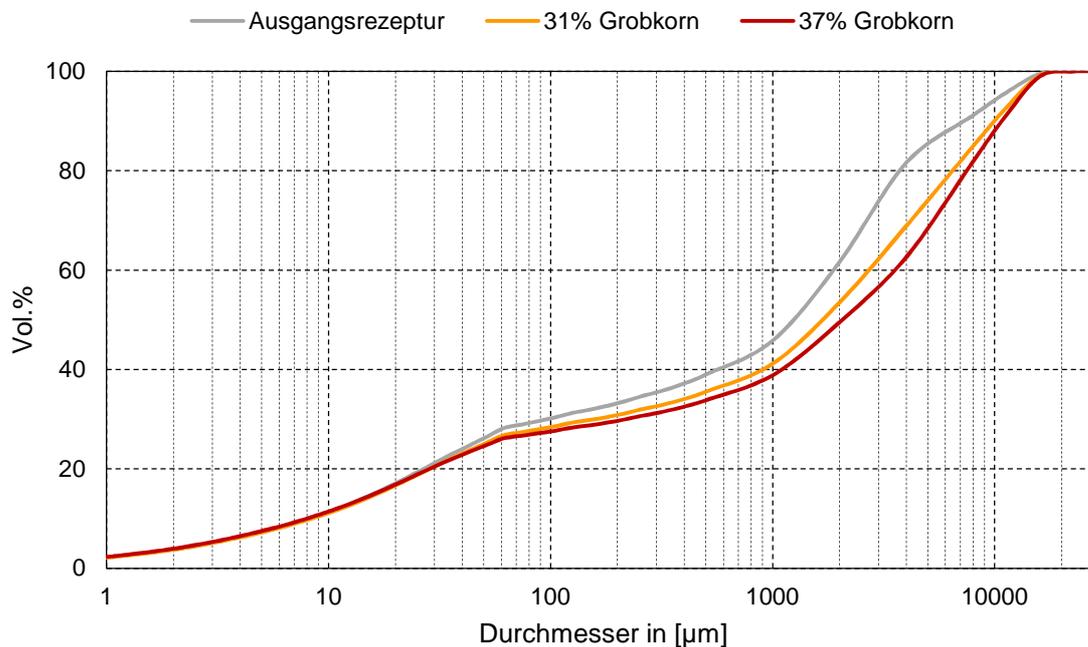


Abbildung 4.8: Korngrößenverteilung der untersuchten Mischungen

4.4.3 Ecofüller

Ecofüller weisen wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben einen mittleren Korndurchmesser d_{50} von 5-30 μm auf [15]. Des Weiteren kann zwischen hydraulisch wirksamen und inerten Ecofüllern unterschieden werden. Um hohe Festigkeiten und eine hohe Gefügedichte zu erhalten sollte der Wasser/Bindemittelwert möglichst gering sein. Gleichzeitig sollte das Volumenverhältnis zwischen Wasser/Mehlkorn hoch sein, um die gewünschten Fließeigenschaften zu erreichen. Um diese beiden Verhältnisse in einen geeigneten Bereich zu bringen empfehlen sich hydraulisch wirksame Ecofüller. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass auch als inert deklarierte Ecofüller wie z.B. Kalkmehl einen Einfluss auf die Zementhydratation haben können [31], was auch deren Einsatz attraktiv machen kann. Um den Einfluss verschiedener Ecofüller und deren Dosierung zu untersuchen wurden mehrere Betonrezepturen untersucht. Aufgrund der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche, vor allem aus dem Kapitel 3, und den eben beschriebenen Parametern wurde hauptsächlich der Einsatz von Flugasche und Hüttensand in Betracht gezogen. Da Flugasche in Österreich nicht mehr produziert wird, kam in dieser Masterarbeit Hüttensand zum Einsatz. Es wurde untersucht ob dieser als Ecofüller geeignet ist und ob Zement teilweise durch Hüttensand substituiert werden kann. Ebenfalls wurde untersucht wie sich dieser im Vergleich zum in der Ausgangsmischung vorhandenen Dolomitsteinmehls verhält. Die Dosierung der Ecofüller erfolgte dabei unter Berücksichtigung der maximalen Zugabemenge nach ÖNORM B 4710-1. Die untersuchten Betonrezepturen werden in Tabelle 4.9 dargestellt.

Bezeichnung		T31	T32	T33
Zement	[kg/m ³]	420	420	327
MS1	[kg/m ³]	40	40	40
Dol 16.5	[kg/m ³]	100	-	-
HS1	[kg/m ³]	-	101	135
Wasser	[kg/m ³]	198,5	198,5	197,1
FM1	[kg/m ³]	4,77	4,34	3,30
KH1	[kg/m ³]	-	-	-
E1	[kg/m ³]	0,7	0,7	0,7
S 0/2	[kg/m ³]	251	251	252
S 0/4	[kg/m ³]	485	485	486
G 4/16	[kg/m ³]	1007	1007	1057
w/b		0,43	0,37	0,42

Tabelle 4.9: Rezepturen zur Untersuchung der Ecofüller

4.4.4 Mikrofüller

Der Einsatz von Mikrofüllern kann wie bereits in Kapitel 2.2.4 beschrieben Vorteile für eine Betonmischung bringen. Bis zu einer Dosierung von ca. 8% des Bindemittelvolumens (Ecofüller eingeschlossen) verringern Mikrofüller den Wasseranspruch der Rezeptur [10] und sorgen dadurch für bessere Fließigenschaften des Betons. Aufgrund der geringen Korngröße haben Mikrofüller eine große spezifische Oberfläche, wodurch sich eine zu hohe Dosierung negativ auf den Wasseranspruch und der Fließgrenze des Frischbetons auswirken kann. Es wurden einige Mischungen mit unterschiedlichen Mikrofüllern und Mikrofüllerdosierungen untersucht, diese sind in Tabelle 4.10 und Tabelle 4.11 dargestellt.

Bezeichnung		T42	T43
Zement	[kg/m ³]	326	323
MS1	[kg/m ³]	40	20
Kal 1.0	[kg/m ³]	50	30
Dol 2.6	[kg/m ³]	-	-
HS1	[kg/m ³]	135	134
Wasser	[kg/m ³]	198,6	199,4
FM1	[kg/m ³]	3,30	2,86
KH1	[kg/m ³]	-	1,0
E1	[kg/m ³]	0,8	0,8
S 0/2	[kg/m ³]	245	249
S 0/4	[kg/m ³]	472	480
G 4/16	[kg/m ³]	1027	1046
w/b		0,42	0,44

Tabelle 4.10: Rezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Mikrofüller 1

Dabei kamen die Mikrofüller MS1, Kal 1.0 und Dol 2.6 zum Einsatz. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass das Mikrosilika MS1 in Slurryform vorlag, welches 50 M-% Wasser

und 50 M-% Feststoffe beinhaltet. Die Dosierung der Mikrofüller erfolgte in Hinblick auf die eben beschriebene 8% Grenze.

Bezeichnung		T51	T53	T54	T61
Zement	[kg/m ³]	339	339	338	358
MS1	[kg/m ³]	-	-	40	-
Kal 1.0	[kg/m ³]	-	-	16	38
Dol 2.6	[kg/m ³]	38	38	-	-
HS1	[kg/m ³]	145	145	145	153
Wasser	[kg/m ³]	194,3	195,4	198,0	199,6
FM1	[kg/m ³]	2,8	1,6	3,0	2,1
KH1	[kg/m ³]	-	1,8	1,8	1,4
E1	[kg/m ³]	1,0	1,0	1,0	1,0
S 0/2	[kg/m ³]	309	250	250	302
S 0/4	[kg/m ³]	595	483	480	582
G 4/16	[kg/m ³]	864	1033	1028	845
w/b		0,43	0,43	0,40	0,42

Tabelle 4.11: Rezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Mikrofüller 2

4.4.5 Leimvolumen

Je nach Korngrößenverteilung und Kornform der Gesteinskörnung ist ein gewisses Leimvolumen erforderlich, um geeignete Fließeigenschaften des Frischbetons zu gewährleisten. Dieses wurde im Zuge dieser Masterarbeit mehrmals verändert um die Auswirkungen dieser Veränderung zu erfassen. Es wurde jedoch nicht nur das gesamte Leimvolumen verändert, auch die Korngrößenverteilung der Feststoffe des Leimvolumens wurde vor allem durch den Einsatz von Mikrofüllern sehr stark verändert.

4.4.6 Wassergehalt und w/b Wert

Der Wassergehalt der Mischungen wurde ausgehend von der Ausgangsmischung nur geringfügig verändert, da dieser den Empfehlungen der Österreichischen Richtlinie für Selbst- und Leichtverdichtbaren Beton entspricht. Außerdem kann mit diesem Wassergehalt ein geeigneter w/b Wert erreicht werden. Auch ein geeignetes V_w/V_p nach dem Mixdesign von Okamura kann erzielt werden.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Verhalten des Frischbetons

5.1.1 Einfluss der Zusatzmittel

In der ersten Versuchsserie sollte festgestellt werden, welchen Einfluss die Zusatzmitteldosierung auf die Betoneigenschaften hat. Dafür wurden die Ausgangsrezeptur (T11) sowie eine zweite Rezeptur mit einem veränderten Verhältnis von Fließmittel zu Konsistenzhalter (T12) untersucht. Die Dosierung des Entlüfters blieb unverändert. Die Zusatzmitteldosierung der beiden Rezepturen ist nochmals in Tabelle 5.1 dargestellt.

Bezeichnung		T11	T12
FM1	[kg/m ³]	5,4	4,0
KH1	[kg/m ³]	3,0	4,0
E1	[kg/m ³]	0,7	0,7

Tabelle 5.1: Rezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Zusatzmitteldosierung

Es stellte sich heraus, dass die Zusatzmitteldosierung sowohl für T11 als auch für T12 zu hoch liegt. Dies äußerte sich durch starkes Absetzen und Bluten der Mischungen zu einem Zeitpunkt 10 Minuten nach Wasserzugabe. Beide Mischungen wurden mit fortschreitender Zeit deutlich stabiler. Dabei stabilisierte sich T12 um wenige Minuten früher als T11, da das Absetzverhalten der Mischung von Anfang an besser war. Beide Mischungen waren nach 30 Minuten stabil und erzielen mit 76cm identische Fließmaße (Abbildung 5.1).

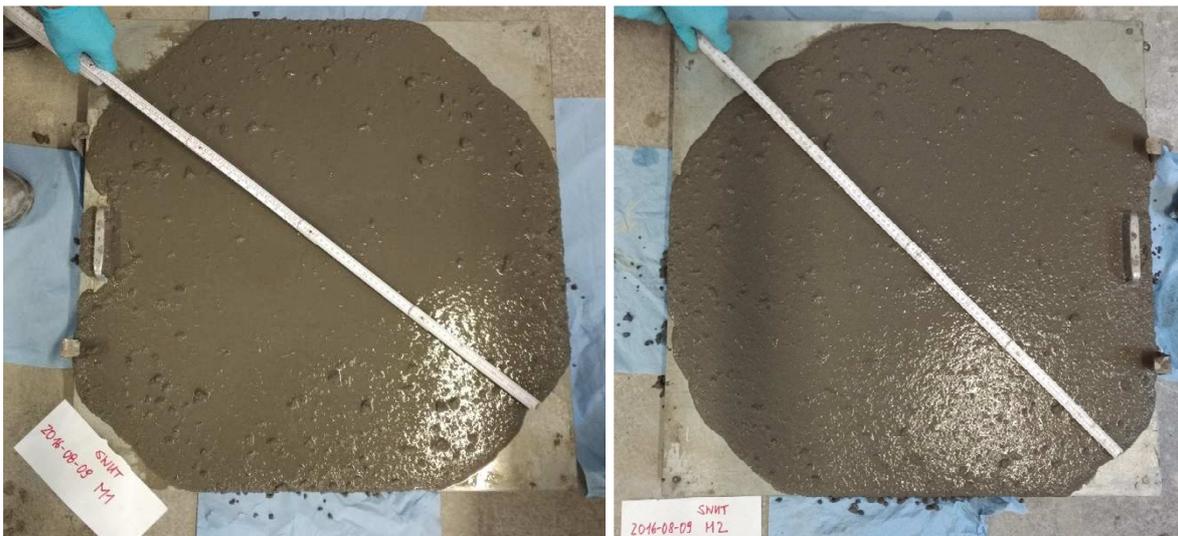


Abbildung 5.1: Fließmaß von jeweils 76cm der Mischungen T11 links und T12 rechts, 30 Minuten nach Wasserzugabe

In Abbildung 5.2 wurden die T₅₀₀-Zeit und das Fließmaß graphisch gegenübergestellt. Diese Parameter sind ebenfalls in Tabelle 5.2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass beide Rezepturen

ein annähernd identisches Fließmaß erreichen, dabei fällt die T₅₀₀-Zeit für Mischung T12 geringer aus als jene von T11. Ebenfalls veranschaulicht Abbildung 5.2, dass die Stabilität der Mischungen nicht unmittelbar aus diesem Diagramm erkennbar ist, denn die beiden Werte 22 bzw. 33 Minuten nach Wasserzugabe liegen eng nebeneinander. Die rot dargestellten Werte in Tabelle 5.2 weisen darauf hin, dass es zu diesem Zeitpunkt zum Bluten und Absetzen gekommen ist.

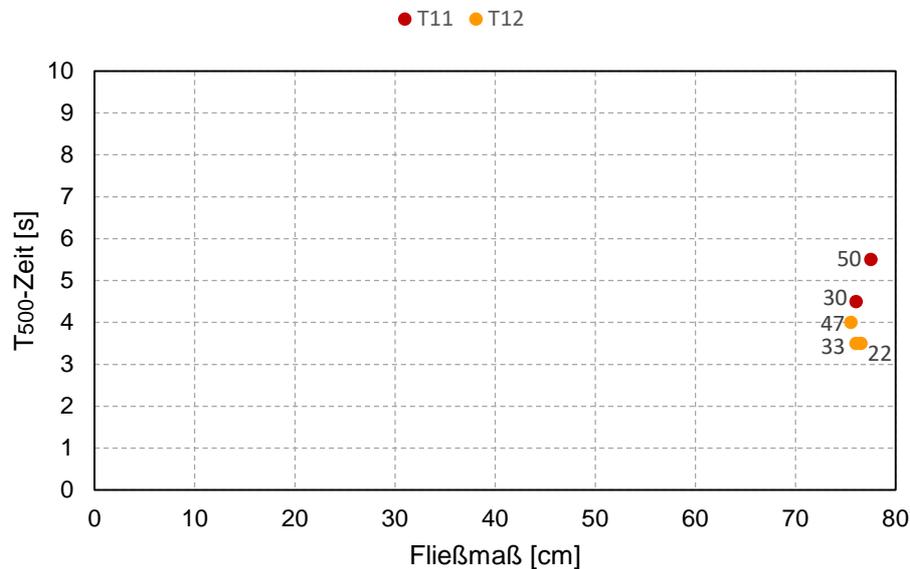


Abbildung 5.2: Beziehung zwischen Fließmaß und T₅₀₀-Zeit

		T11			T12		
Zeitpunkt	[min]	15	30	50	22	33	47
Fließmaß	[cm]	-	76	77,5	76,5	76	75,5
T ₅₀₀ -Zeit	[s]	-	4,5	5,5	3,5	3,5	4
Endfestigkeit	[MPa]		110			100	
Konsistenzh.	[-]		1,02			0,99	
Luftporen	[%]		0,3			0,5	
Zusatzmittel	[kg/m ³]		8,7			8,7	

Tabelle 5.2: Parameter der untersuchten Mischungen

Besonders auffallend ist der niedrige Luftporengehalt der Mischungen, welcher nach 45 Minuten 0,3% für T11 und 0,5% für T12 beträgt. Die Differenz ist auf den früheren Konsistenzverlust von T12 zurückzuführen, welcher aufgrund der früheren Stabilität von T12 einsetzt. Die Zusatzmitteldosierung hat dementsprechend einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität und Konsistenzhaltung der Mischung.

In dieser Versuchsserie konnte festgestellt werden, dass die Ausgangsrezeptur unabhängig von deren Beständigkeit gegen lösenden Angriff weiter verändert werden sollte, um einen funktionierenden SCC zu erhalten.

5.1.2 Einfluss der Korngrößenverteilung

In einer weiteren Versuchsserie wurde untersucht, welchen Einfluss die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung auf das Verhalten der Mischungen sowie auf deren Konsistenzhaltung hat. In dieser Versuchsserie wurde kein Konsistenzhalter verwendet, um den Effekt der Konsistenzhaltung unabhängig von diesem bestimmen zu können. Die Fließmitteldosierung erfolgte nach Augenschein beim Mischen. Die Ausgangsrezeptur verfügt über einen Stoffanteil der Korngruppe größer als 4mm von 18%. Dieser wurde bei T22 und T23 auf 31% und 37% des Feststoffanteils, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, erhöht. Außerdem wurde bei der Mischung T23 der Ecofüller geändert. Hier kam Hüttensand statt Dol 16.5 zum Einsatz. Die Rezepturen dieser Versuchsserie sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

Bezeichnung		T21	T22	T23
S 0/2	[kg/m ³]	437	313	252
S 0/4	[kg/m ³]	843	603	486
G 4/16	[kg/m ³]	510	876	1057

Tabelle 5.3: Rezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Korngrößenverteilung

Es wurde festgestellt, dass die Ausgangsrezeptur ohne Konsistenzhalter (T21) 13 Minuten nach Wasserzugabe ein Fließmaß von lediglich 62cm aufweist, wobei die Mischung stabil war. Der Luftporengehalt ohne Konsistenzhalter ist jedoch mit 1,5% nach 15 Minuten und mit 1,9% nach 45 Minuten deutlich angestiegen.



Abbildung 5.3: Fließmaß der Mischungen T21 links (13Min; 62cm); T22 mitte (50Min; 73cm); T23 rechts (52Min; 66,5cm)

Die Mischung T22 benötigte aufgrund des geringeren Anteils an kleineren Korngrößen deutlich weniger Fließmittel. Obwohl etwas weniger Fließmittel zugegeben wurde als bei T21, kam es zu Bluten und zum Absetzen der groben Gesteinskörnung nach 10 Minuten. Die Mischung stabilisierte sich nach 35 Minuten. Der Luftporengehalt war mit 0,6% nach 50 Minuten um einiges besser als bei T21.

Bei der Mischung T23 konnte derselbe Effekt beobachtet werden. Diese Mischung benötigte am wenigsten Fließmittel und verfügte über einen Luftporengehalt von 0,8% nach 50 Minuten.

Es konnte festgestellt werden, dass die T_{500} -Zeit der Mischungen T22 und T23 geringer ausfielen als jene von T21, siehe Abbildung 5.4. Dies lässt auf eine geringere plastische Viskosität dieser beiden Mischungen schließen.

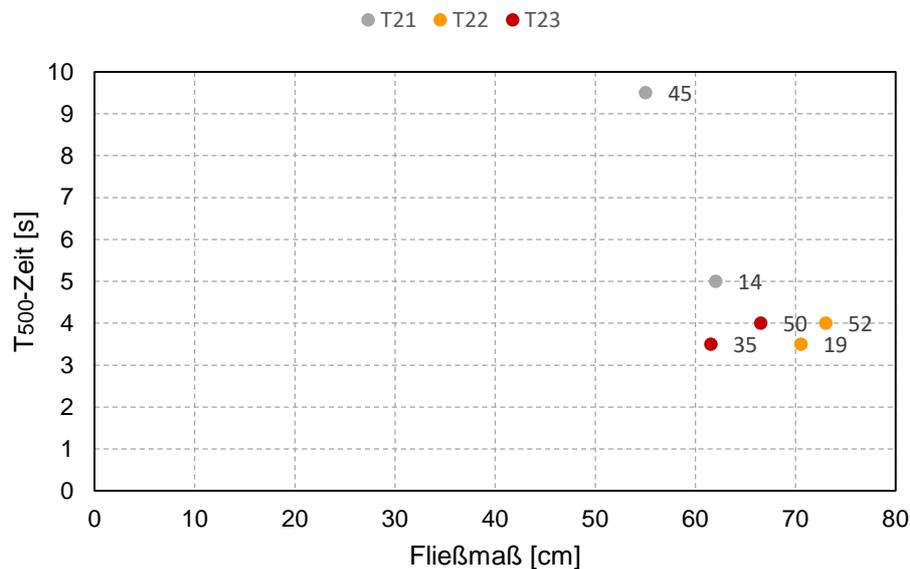


Abbildung 5.4: Beziehung zwischen Fließmaß und T_{500} -Zeit

In Tabelle 5.4 werden einige Parameter dieser Mischungen gegenübergestellt.

		T21		T22		T23	
Zeitpunkt	[min]	13	45	35	50	19	52
Fließmaß	[cm]	62	55	70,5	73	61,5	66,5
T_{500} -Zeit	[s]	5	9,5	3,5	4	3,5	4
Frühfestigkeit	[MPa]	25		26		23	
Endfestigkeit	[MPa]	88		99		103	
Konsistenzh.	[-]	0,89		1,04		1,08	
Luftporen	[%]	1,9		0,6		0,8	
Zusatzmittel	[kg/m ³]	5,1		5,0		4,6	

Tabelle 5.4: Parameter der untersuchten Mischungen

Aufgrund des niedrigeren Zusatzmittelanspruchs und des niedrigeren Luftporengehaltes der Mischungen T22 und T23 wurde die Rezeptur in weiterer Folge mit diesen Korngrößenverteilungen weiterentwickelt.

5.1.3 Einfluss der Leimzusammensetzung

In einer weiteren Versuchsserie wurde überprüft, welche Auswirkungen eine Erhöhung des Leimvolumens sowie die Variation der Mengen Dol 16.5, Hüttensand und Zement haben. Als Basisrezeptur diente dabei T23 der letzten Versuchsserie, welche einen Grobkornanteil von 37% aufweist, 420kg/m³ Zement und 51kg/m³ Ecofüller beinhaltet. Bei der Mischung T31

wurde der Anteil des Ecofüllers Dol 16.5 auf 100 kg/m^3 erhöht. Anschließend wurde für T32 100 kg/m^3 des Ecofüllers Hüttensand verwendet. Bei der Rezeptur T33 wurde das Leimvolumen im Vergleich zu T23 nicht erhöht, sondern ein Teil des Zementes durch Hüttensand substituiert. In Tabelle 5.5 sind Auszüge der Rezepturen dieser Versuchsserie ersichtlich.

Bezeichnung		T23	T31	T32	T33
Zement	[kg/m^3]	420	420	420	327
Dol 16.5	[kg/m^3]	-	100	-	-
HS1	[kg/m^3]	51	-	101	135

Tabelle 5.5: Rezepturen der dritten Versuchsserie

Der Rezeptur T31 wurde anfangs $3,9 \text{ kg/m}^3$ Fließmittel zugegeben, was zu einem Fließmaß von 48 cm führte. Eine Erhöhung des Fließmittelgehaltes auf $4,8 \text{ kg/m}^3$ führte zur Instabilität der Mischung. Diese stabilisierte sich mit fortschreitender Zeit, 46 Minuten nach Wasserzugabe erreichte die stabile Mischung ein Fließmaß von 70 cm , der Luftporengehalt betrug $0,8\%$. Abbildung 5.5 stellt die Fließgrenze und die T_{500} -Zeit der Mischungen dieser Versuchsserie gegenüber.

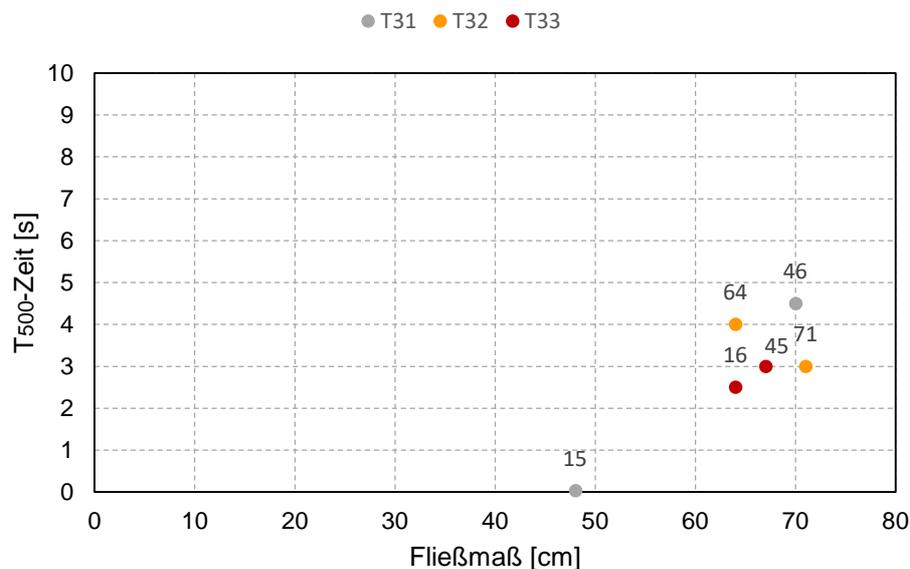


Abbildung 5.5: Beziehung zwischen Fließmaß und T_{500} -Zeit

Die Mischung T32 wies einen geringeren Fließmittelanspruch als T31 dieser Versuchsserie auf. Obwohl der Fließmittelgehalt auf $4,24 \text{ kg/m}^3$ gesenkt wurde, kam es zum Bluten und Absetzen der groben Gesteinskörnung 18 Minuten nach Wasserzugabe. 47 Minuten nach Wasserzugabe war die Mischung stabil und erreichte ein Ausbreitmaß von 64 cm . Der Luftporengehalt betrug dabei $1,0\%$.



Abbildung 5.6: Fließmaß der Mischungen T31 links (46Min; 70 cm); T32 mitte (47Min; 64cm); T33 rechts (45Min; 67cm)

Die Mischung T33 wurde dermaßen konzipiert, dass 30% des anrechenbaren Bindemittelgehaltes aus AHWZ, also Hüttensand und Mikrosilika besteht. Diese Mischung war mit einem Fließmittelgehalt von $2,9 \text{ kg/m}^3$ stabil und erreichte ein Fließmaß von 64cm. Die Mischung hat mit 2,5 Sekunden eine sehr niedrige T_{500} -Zeit, was auf eine sehr geringe plastische Viskosität schließen lässt. Anschließend wurde der Fließmittelgehalt auf $3,3 \text{ kg/m}^3$ erhöht, was zur Instabilität der Mischung führte. Wiederum wurde 45 Minuten nach Wasserzugabe das Fließmaß bestimmt, dieses betrug 67 cm. Der Luftporengehalt betrug 0,9%. In Tabelle 5.6 werden einige Parameter der drei Rezepturen veranschaulicht.

		T31		T32		T33	
Zeitpunkt	[min]	15	46	18	47	16	45
Fließmaß	[cm]	48	70	71	64	64	67
T_{500} -Zeit	[s]	-	4,5	3	4	2,5	3
Frühfestigkeit	[MPa]	22		25		15	
Endfestigkeit (7d)	[MPa]	63		61		56	
Konsistenzh.	[-]	1,46		0,90		1,05	
Luftporen	[%]	0,8		1,0		0,9	
Zusatzmittel	[kg/m ³]	5,5		5,0		4,0	

Tabelle 5.6: Parameter der untersuchten Mischungen

Es konnte festgestellt werden, dass der Fließmittelanspruch des Hüttensandes im Vergleich zum Dol 16.5 und zum Zement geringer ausfällt. Deshalb wurde bei den folgenden Rezepturen Hüttensand als Ecofüller verwendet.

5.1.4 Einfluss eines Mikrofüllers

Da die Stabilität der vorher untersuchten Mischungen nicht ausreichend erschien, um einen funktionierenden selbstverdichtenden Beton zu gewährleisten, wurde in dieser Versuchsserie der Einfluss eines Mikrofüllers untersucht. Hierfür wurde das Kalkmehl Kal 1.0 mit einem mittleren Korndurchmesser d_{50} von $1\mu\text{m}$ untersucht. Das ist ca. 1/10 des mittleren

Korndurchmessers von Zement. Da die Korngrößenverteilung des Mikrosilika ebenfalls einen mittleren Korndurchmesser d_{50} von unter $5\mu\text{m}$ (bei vollständiger Dispergierung $d_{50}\sim 0,2\mu\text{m}$) aufweist, kann auch Mikrosilika als Mikrofüller einzustufen werden. Auszüge der getesteten Betonrezepturen sind in Tabelle 5.7 dargestellt.

Bezeichnung		T42	T43
MS1	[kg/m ³]	40	20
Kal 1.0	[kg/m ³]	50	30
Dol 2.6	[kg/m ³]	-	-

Tabelle 5.7: Mischungsrezepturen zur Untersuchung des Mikrofüllers 1

Bei Mischung T42 wurde 50kg/m^3 Kal 1.0 verwendet. Bei einem Fließmittelgehalt von $3,3\text{kg/m}^3$ kam es zu leichtem Bluten, ansonsten war die Mischung stabil. Die Mischung wies nach 10 Minuten ein Fließmaß von 66cm , nach 46 Minuten ein Fließmaß von $60,5\text{cm}$ auf.

Die Mischung T43 enthielt die Hälfte an Mikrosilika von T42, auch das Kal 1.0 wurde auf 30kg/m^3 reduziert. Obwohl mit einem niedrigeren Fließmittelgehalt von $2,86\text{kg/m}^3$ und einem Konsistenzhaltergehalt von $1,0\text{kg/m}^3$ gestartet wurde, war die Mischung instabil und stabilisierte sich erst nach 45 Minuten, wobei auch dann noch leichtes Bluten zu erkennen war. Das zu diesem Zeitpunkt erreichte Fließmaß von 73cm ist deshalb wenig aussagekräftig.

Ebenfalls wurde in einer weiteren Versuchsserie das Dolomitsteinmehl Dol 2.6 mit einem mittleren Korndurchmesser d_{50} von $2,6\mu\text{m}$ verwendet. Auch Kal 1.0 und Mikrosilika kamen in dieser Versuchsserie nochmals zum Einsatz. Einige Auszüge der Rezepturen dieser Versuchsserie werden in Tabelle 5.8 dargestellt.

Bezeichnung		T51	T53	T54	T61
MS1	[kg/m ³]	-	-	40	-
Kal 1.0	[kg/m ³]	-	-	16	38
Dol 2.6	[kg/m ³]	38	38	-	-

Tabelle 5.8: Mischungsrezepturen zur Untersuchung des Mikrofüllers 2

Bei Mischung T51 wurde erstmals vollkommen auf Mikrosilika verzichtet. Der w/b Wert wurde mit $0,43$ beibehalten, was zu einer geringeren Wassermenge führte. Die Mischung blutete leicht und erreichte nach 8 Minuten ein Fließmaß von $79,5\text{cm}$, was auf eine geringe Fließgrenze schließen lässt. Ebenfalls wies die Mischung eine geringe plastische Viskosität auf, die T_{500} -Zeit betrug nämlich $2,5$ Sekunden. Der Luftporengehalt betrug $1,2\%$. Das erreichte Fließmaß nach 30 Minuten betrug lediglich $57,5\text{cm}$. Obwohl die Mischung gut funktionierte, war die Konsistenzhaltung also nicht ausreichend.

erreicht. Der Luftporengehalt betrug dabei 0,8%. Tabelle 5.9 veranschaulicht einige Parameter der untersuchten Mischungen.

		T42		T43		T51		T53		T54		T61	
Zeitpunkt	[min]	10	47	-	45	8	30	10	30	18	30	10	30
Fließmaß	[cm]	66	60,5	-	73	79,5	57,5	70	44	75	70	69	50
T ₅₀₀ -Zeit	[s]	2	2	-	2	2,5	4,5	2,5	-	2	2	2,5	10
Frühfestigkeit	[MPa]	18		15		-		-		17		-	
Endfestigkeit	[MPa]	100		91		-		-		112		90	
Konsistenzh.	[-]	0,92		-		0,72		0,63		0,93		0,73	
Luftporen	[%]	-		-		1,4		1,1		0,8		1,4	
Zusatzmittel	[kg/m ³]	4,1		4,7		3,8		4,4		5,8		4,5	

Tabelle 5.9: Parameter der untersuchten Mischungen

Aus dieser Versuchsserie kann geschlossen werden, dass Kal 1.0 und Dol 2.6 eine stabilisierende Wirkung haben. Ebenfalls wird aus dieser Versuchsserie ersichtlich, dass der Konsistenzhalter für diese Mischungen nicht funktioniert. Im Normalfall wird der Beton im Fertigteilwerk relativ rasch nach der Herstellung eingebaut, weshalb das Fließmaß nach 10 Minuten durchaus ausreichen könnte. Dennoch wäre eine bessere Konsistenzhaltung der Mischungen ohne Mikrosilika wünschenswert, um einen reibungslosen Einbau selbst bei geringfügigen Störungen im Produktionsverlauf gewährleisten zu können.

5.2 Druckfestigkeit

Sowohl die Druckfestigkeit nach 24h, als auch die Druckfestigkeit nach 28 Tagen sind in einem Fertigteilwerk von großer Bedeutung. In Abbildung 5.9 sind die erzielten Druckfestigkeiten dargestellt.

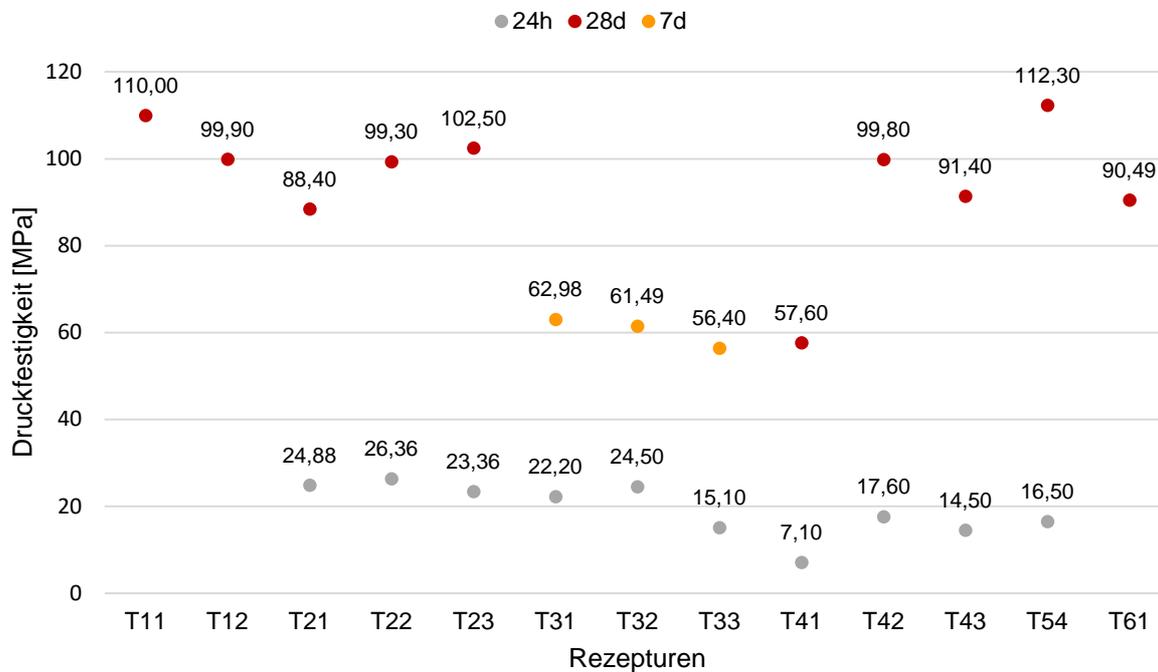


Abbildung 5.9: Druckfestigkeiten der untersuchten Betonmischungen nach 24 Stunden und 28 Tagen (7 Tagen)

5.2.1 Druckfestigkeit nach 24h

Für das Erreichen hoher Anfangsfestigkeiten sind ein gewisser Zementgehalt und ein niedriger w/b Wert erforderlich. Ebenfalls beeinflussen Mikro- und Ecofüller die Druckfestigkeit geringfügig. Bei einem Zementgehalt von 420kg/m^3 konnte der Ecofüller Dol 16.5 im Vergleich zum Hüttensand die Druckfestigkeit um ca. 2 MPa erhöhen. Ein ähnlicher Effekt ist durch den Mikrofüller Kal 1.0 zu erreichen. Es ist eine deutliche Korrelation zwischen Zementgehalt und Frühfestigkeit zu erkennen. Die Rezepturen mit einem Zementgehalt von 420kg/m^3 erreichen Frühfestigkeiten von ca. 25 MPa, die Rezepturen mit einem Zementgehalt von ca. 330kg/m^3 erreichen Frühfestigkeiten von ca. 15 MPa. Durch geeignete Mikro- und Ecofüller kann diese leicht angehoben werden. Der Einfluss eines zu geringen Zementgehaltes, bzw. eines daraus resultierenden zu hohen w/b Wertes konnte durch die Rezeptur Eco-Scc veranschaulicht werden. Dieser Beton erreicht nach 24 h eine Druckfestigkeit von lediglich 7 MPa.

5.2.2 Druckfestigkeit nach 28d

Die Rezepturen T22 und T23 veranschaulichen, dass das Defizit des Hüttensandes im Vergleich zum Dol 16.5 in der Frühfestigkeit im Laufe einer Erhärungszeit von 28 Tagen überwunden wurde. Es ist weiter davon auszugehen, dass die Druckfestigkeit durch den

Hüttensand mit zunehmendem Betonalter noch weiter ansteigt. Um eine Druckfestigkeitsklasse von C45/55 zu erreichen, ist bei der Erstprüfung eine Druckfestigkeit der Prüfkörper von

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 4 \quad (5.1)$$

zu erreichen [4]. Die untersuchten Rezepturen erreichten höhere Druckfestigkeiten als 59 MPa und könnten dementsprechend auch als C60/75 bzw. C70/85 eingestuft werden. Die Mischung T54 erreicht durch ihren niedrigen w/b Wert von 0,40 und 40kg/m³ Mikrosilika (Slurry) mit 112,30 MPa die höchste Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

5.3 Beständigkeit gegen lösenden Angriff

In dieser Arbeit wird eine Verbesserung der Beständigkeit gegen lösenden Angriff durch Veränderung des Leims angestrebt. Die in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner ausgewählte Gesteinskörnung wird im Zuge dieser Arbeit nicht verändert. Diese sollte in zukünftigen Entwicklungsschritten jedoch betrachtet werden.

Die Beständigkeit gegen lösenden Angriff kann auf mehrere Arten verbessert werden. Dabei sollten die Bestandteile wenig lösliche Anteile aufweisen. Um die Wirkung des Angriffs zu verlangsamen, sollten die schädlichen Stoffe nur langsam in den Beton eindringen. Durch herabsetzen des w/b Wertes können die Kapillarporen verringert, und die Beständigkeit somit erhöht werden. Die Betonoberfläche sollte möglichst dicht und lunkerfrei sein, um die Angriffsfläche für schädliche Substanzen zu verringern. Durch ausreichende Nachbehandlung kann die Dichtheit erhöht werden. [21]

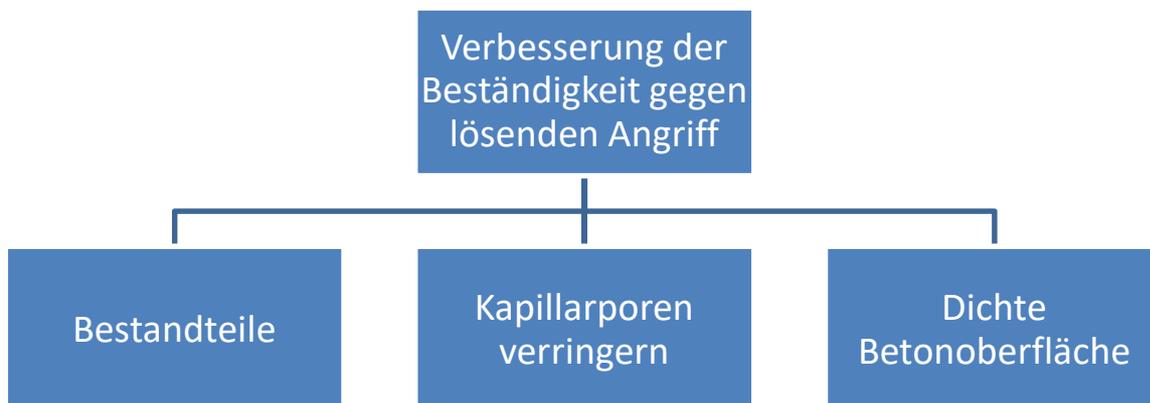


Abbildung 5.10: Verbesserung der Beständigkeit gegen lösenden Angriff; Inhalt aus [21]

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden in erster Linie die Bestandteile und die Zusammensetzung des Leims in Hinblick auf eine bessere Beständigkeit gegen lösenden Angriff optimiert, da die Ausgangsmischung bereits eine sehr dichte Betonoberfläche aufwies. Dabei wurde der w/b Wert der beständigen Mischungen herabgesetzt um Kapillarporen zu verringern. Ebenfalls wurden der latent hydraulische Zusatzstoff Hüttensand und Mikrofüller verwendet, um eine höhere Gefügedichte zu erzielen.

Die Beständigkeit gegen lösenden Angriff wurde für folgende Mischung experimentell ermittelt:

- Versuchsserie 1: T21, T22, T23
- Versuchsserie 2: T31, T32, T33
- Versuchsserie 3: T54, T61

Dabei wurden die Biegezugfestigkeit, der Massenverlust und der unbeschädigte Teil der Bruchfläche aufgrund des lösenden Angriffs, wie im Kapitel 4.2 Prüfkörper und Prüfverfahren beschrieben, betrachtet.

In Versuchsserie 1 wurden verschiedene Korngrößenverteilungen untersucht. Dabei kamen die in Kapitel 4.4.2 beschriebenen Rezepturen zum Einsatz. In T23 kam statt dem Ecofüller Dol 16.5 Hüttensand zum Einsatz. In Versuchsserie 2 wurden die Betonrezepturen T31, T32 und T33 untersucht, welche in Kapitel 4.4.3 angeführt sind. In der 3. Versuchsserie wurden die beiden Rezepturen T54 und T61 untersucht (Kapitel 4.4.4). Die Rezepturen wurden auf die Expositionsklasse XA3L getestet. Die Rezeptur T61 wurde auf XA2L getestet, da diese kein Mikrosilika enthält und somit ein geringerer Widerstand gegen lösenden Angriff zu erwarten war. Alle untersuchten Rezepturen werden in Tabelle 5.10 gegenübergestellt.

Bezeichnung		T21	T22	T23	T31	T32	T33	T54	T61
Zement	[kg/m ³]	420	420	421	420	420	327	338	358
MS1	[kg/m ³]	40	40	40	40	40	40	40	-
Kal 1.0	[kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	16	38
Dol 16.5	[kg/m ³]	50	50	-	100	-	-	-	-
HS1	[kg/m ³]	-	-	51	-	101	135	145	153
Wasser	[kg/m ³]	197,8	197,7	197,3	198,5	198,5	197,1	198,0	199,6
FM1	[kg/m ³]	4,4	4,33	3,90	4,77	4,34	3,30	3,0	2,1
KH1	[kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	1,8	1,4
E1	[kg/m ³]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0
S 0/2	[kg/m ³]	437	313	252	251	251	252	250	302
S 0/4	[kg/m ³]	843	603	486	485	485	486	480	582
G 4/16	[kg/m ³]	510	876	1057	1007	1007	1057	1028	845
w/b		0,43	0,43	0,39	0,43	0,37	0,42	0,40	0,42

Tabelle 5.10: Auf Beständigkeit gegen lösenden Angriff getestete Rezepturen

Die Probekörper der auf XA3L untersuchten Rezepturen werden im Folgenden in Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 dargestellt. Die jeweiligen Bilder wurden nach der dreiwöchigen Essigsäurelagerung bei einem pH-Wert von 4,0-4,5 aufgenommen.

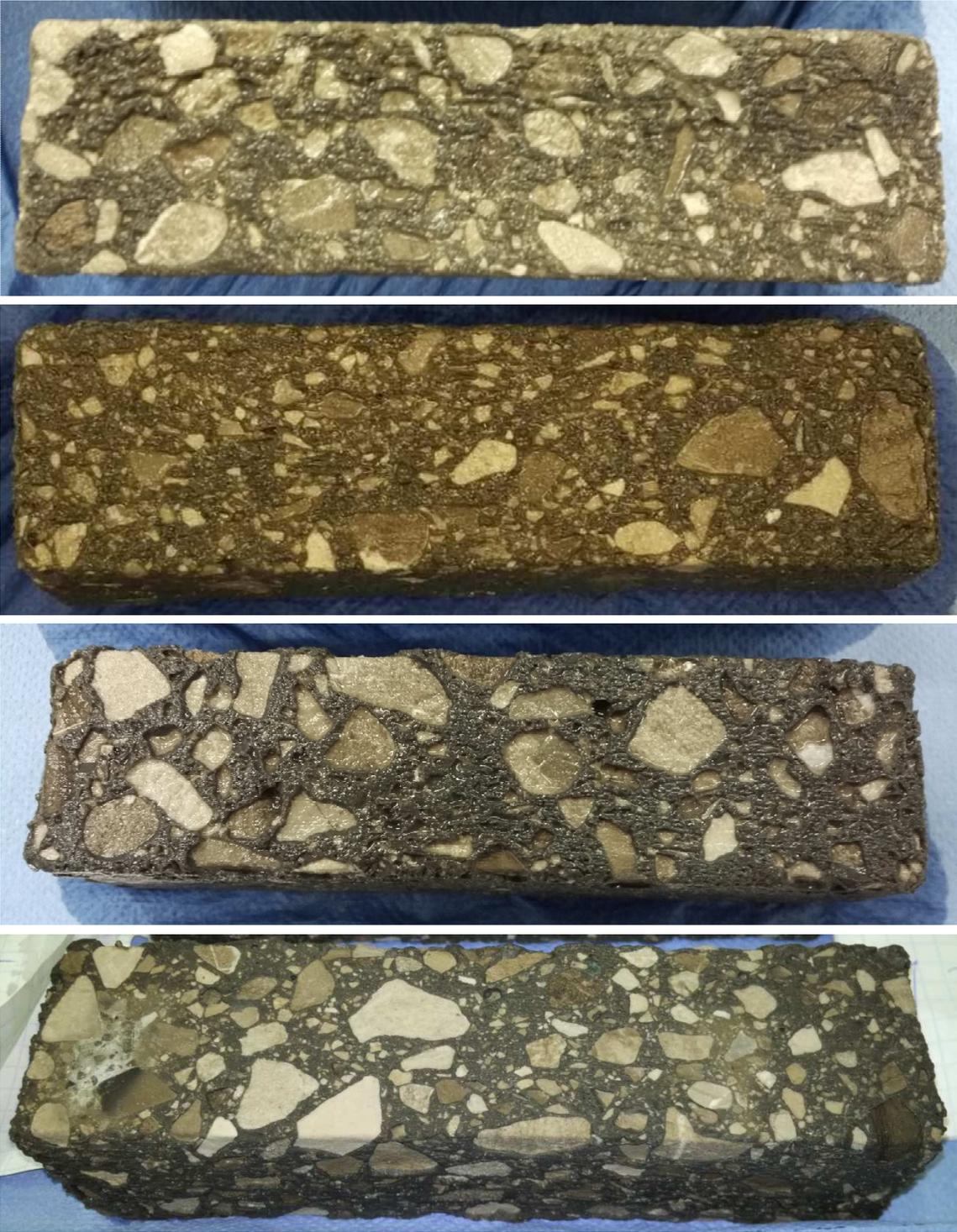


Abbildung 5.11: Probekörper der Rezepturen (von oben) T21, T22, T23, T31

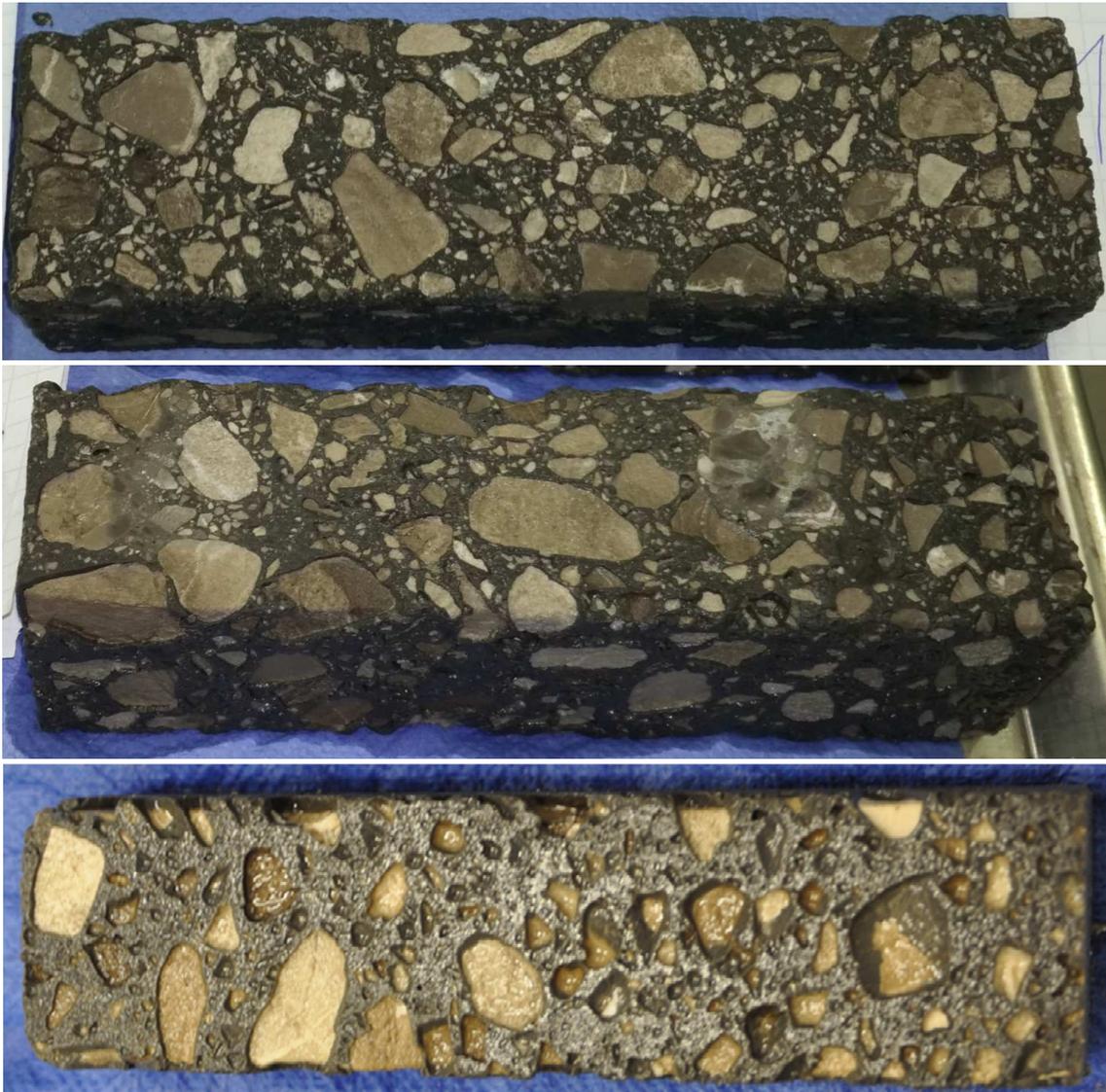


Abbildung 5.12: Probekörper der Rezepturen (von oben) T32, T33, T54

Es ist deutlich zu erkennen, dass Teile der karbonatischen (hoher Dolomitanteil) Gesteinskörnung stärker abgetragen wurden als der Leim. Somit stellt die Gesteinskörnung den Schwachpunkt der Rezepturen dar und ist Hauptverursacher für den Massenverlust, den Tragfähigkeitsverlust und die geschädigte Fläche während der Essigsäurelagerung. Die erhaltenen Messdaten über die Rezepturen sind deshalb kritisch zu hinterfragen. Rückschlüsse auf den Widerstand des Leims gegen lösenden Angriff sind deshalb als Tendenzen zu verstehen und könnten durch die Verwendung einer beständigeren Gesteinskörnung verändert werden. Die ermittelten Ergebnisse dieser Versuchsserien sind in Abbildung 5.13 dargestellt.

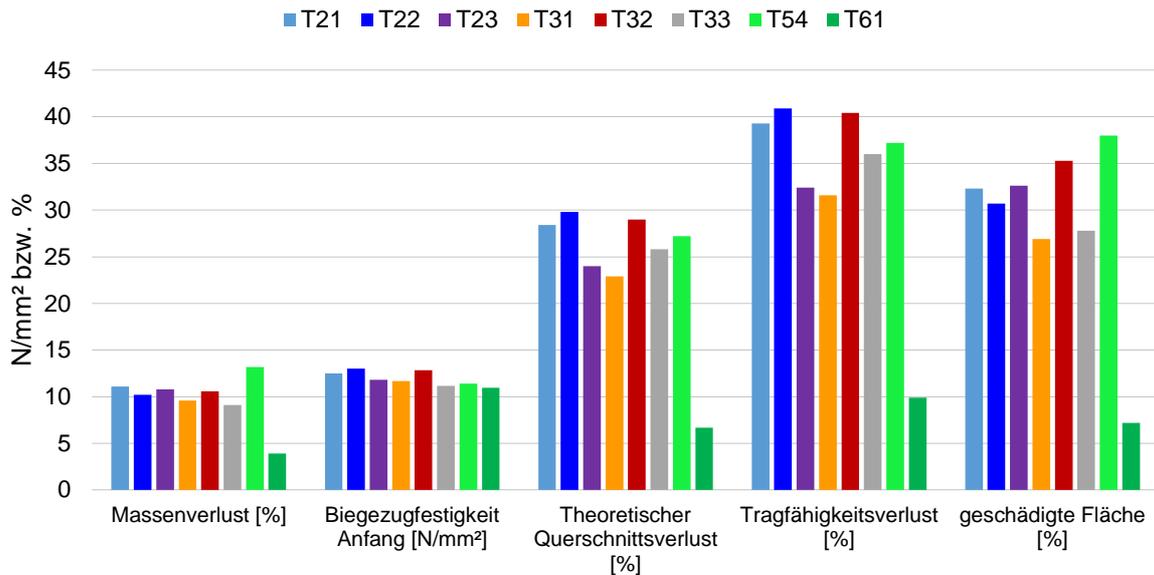


Abbildung 5.13: Ergebnisse der Essigsäurelagerung

Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse relativ eng beieinander liegen. Der etwas größere Massenverlust der Mischung T54 ist nicht auf den schlechten Leim, sondern die starke Abtragung der Gesteinskörnung zurückzuführen. Es ist außerdem zu erkennen, dass die Rezeptur T61 aufgrund der geringeren Beanspruchung einen deutlich niedrigeren Massen- und Tragfähigkeitsverlust aufweist als die anderen Mischungen. Auch die geschädigte Fläche ist im Vergleich um einiges geringer. Abbildung 5.14 zeigt die Probekörper nach Auslagerung.



Abbildung 5.14: Probekörper der Rezeptur T61 nach der Essigsäurelagerung

Des Weiteren ist ersichtlich, dass der Leim und die Gesteinskörnung annähernd gleichmäßig abgetragen wurden, es sind jedoch kleine Vertiefungen bei der Gesteinskörnung zu erkennen,

wodurch diese auch bei der Expositionsklasse XA2L als Schwachpunkt identifiziert werden kann.

Mit diesen Versuchsserien konnte bestätigt werden, dass die Gesteinskörnung der Schwachpunkt für eine Beständigkeit der Expositionsklasse XA3L ist. Die Essigsäurelagerung stellt im Vergleich zum vorgesehenen Anwendungsgebiet als Trinkwasserspeicher jedoch ein extremes Milieu dar. Es ist zu erwarten, dass die karbonatische (hoher Dolomitanteil) Gesteinskörnung eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen weiche Wässer mit aggressivem CO₂ aufweist. Aufgrund der höheren Beständigkeit des Leims im Vergleich zur Gesteinskörnung ist dieser als sehr widerstandsfähig einzustufen.

5.4 Eco-SCC

Die bisherigen Mischungen wiesen einen relativ hohen Bindemittelgehalt auf, um die nötigen Fließeigenschaften von SCC zu erreichen. Einen anderen Zugang bietet das Mixdesign nach dem isländischen Konzept. In einem Laborversuch wurde überprüft, ob ein solcher Beton mit österreichischen Ausgangsmaterialien hergestellt werden kann. Die überprüfte Betonrezeptur ist in Tabelle 5.11 dargestellt. Besonders auffallend ist dabei der geringe Zementgehalt von 209kg/m³. Dies führt zu niedrigen verursachten Treibhausgasemissionen, auch der Primärenergiebedarf dieser Rezeptur ist gering. Zur Erhöhung des Leimvolumens tragen das Mikrosilika, der Hüttensand und der hohe Wassergehalt der Mischung bei. Dadurch ist der w/b Wert der Mischung gegenüber der restlichen untersuchten Mischungen mit 0,65 deutlich höher.

Bezeichnung		T41
Zement	[kg/m ³]	209
MS1	[kg/m ³]	40
Kal 1.0	[kg/m ³]	-
HS1	[kg/m ³]	72
Wasser	[kg/m ³]	197,5
FM1	[kg/m ³]	2,00
KH1	[kg/m ³]	-
E1	[kg/m ³]	0,7
S 0/2	[kg/m ³]	978
S 0/4	[kg/m ³]	-
G 4/16	[kg/m ³]	979
w/b		0,65

Tabelle 5.11: Mischungsrezeptur des untersuchten Eco-SCC

Die Stabilisierung der Mischung erfolgt vor allem durch die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung. Die Korngrößenverteilung nähert wie in [9] empfohlen eine Dinger-Funk Funktion mit der Hochzahl 0,28 an. Die verwendete Korngrößenverteilung ist in Abbildung 5.16 dargestellt. Zum Vergleich wurde die Korngrößenverteilung der Ausgangsrezeptur über den gesamten Kornbereich einschließlich des Mehlkorns hinzugefügt. Es ist ersichtlich, dass weniger Feinteile in der Mischung vorhanden sind, gleichzeitig ist etwas mehr grobe

Gesteinskörnung vorzufinden. Die Mischung verfügt über einen geringen Fließmittelanteil von $2,0 \text{ kg/m}^3$, es wurde kein Konsistenzhalter verwendet. Um die gewünschte Korngrößenverteilung zu erreichen wurden lediglich S 0/2 und G 4/16 verwendet. 13 Minuten nach Wasserzugabe blutete die Mischung leicht, war ansonsten jedoch stabil. Sie wies ein Fließmaß von 64cm auf. Nach 46 Minuten wies die Mischung ein Fließmaß von 62cm auf. Der Luftporengehalt betrug 0,9%. Obwohl das Fließmaß die Österreichische Norm nicht erfüllt, reicht es für einen funktionierenden SCC aus. Durch die niedrige plastische Viskosität werden die notwendigen Fließeigenschaften auch mit niedrigeren Fließmaßen erreicht. [10]



Abbildung 5.15: Fließmaß von 64 cm nach 13 Minuten

Durch den hohen w/b Wert fällt die Druckfestigkeit der Mischung nach 24h zu gering aus, um in einem Fertigteilwerk Verwendung zu finden. Diese Rezeptur erfüllt die Anforderungen für das Einsatzgebiet also nicht.

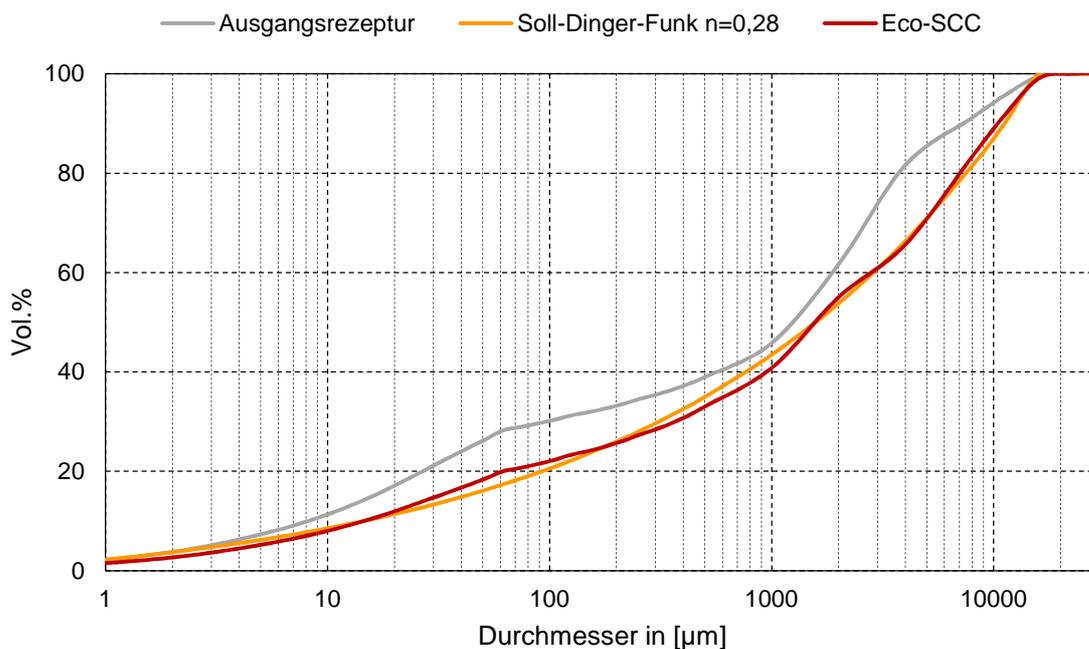


Abbildung 5.16: Korngrößenverteilung des Eco-SCC

5.5 GWP, PE, Preis

In Abbildung 5.17 sind die verursachten Treibhausgasemissionen (GWP), der Primärenergiebedarf (PE) sowie der Preis der untersuchten Mischungen gegenübergestellt. Die verwendete Datenbasis ist in Tabelle 5.12 ersichtlich

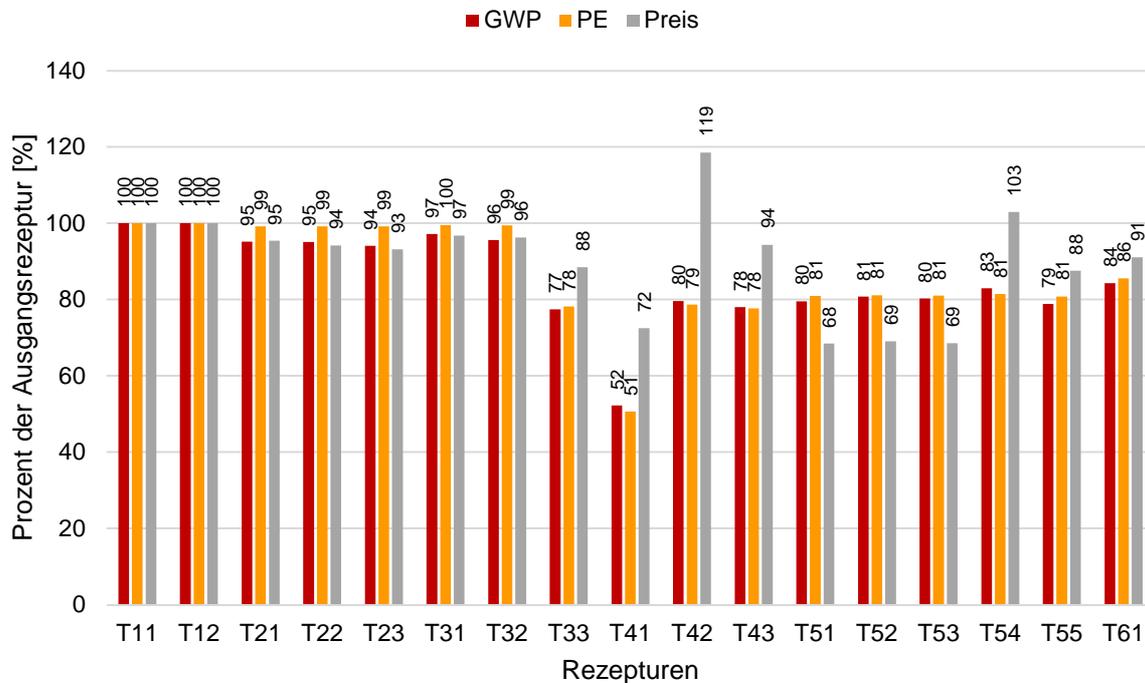


Abbildung 5.17: GWP, PE und Preis der untersuchten Mischungen

	GWP [kgCO ₂ /t]	PE [MJ/t]	Preis [€/t]
Zement	4030	831	95
MS1	1000	50	660
Kal 1.0	1000	50	600
Dol 2.6	900	40	80
Dol 16.5	720	25	60
HS1	500	25	60
FM1	29150	945	1300
KH1	29150	945	1300
E1	29150	945	5200
S 0/2	58	2,5	9
S 0/4	58	2,5	11
G 4/16	58	2,5	7

Tabelle 5.12: Datenbasis zur Ermittlung von GWP, PE und Preis

Es geht hervor, dass der Zement der Hauptverursacher der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfes ist. Deshalb fallen die Ergebnisse für Mischungen, bei denen ein Teil des Zementes durch Hüttensand substituiert wurde, in dieser Hinsicht besser aus. Es ist eine Reduktion dieser Umweltwirkungen von ca. 20% erkennbar. Der Preis der verschiedenen Rezepturen wird vor allem durch Feinstoffe wie dem Mikrosilika sowie Dol 1.0 stark beeinflusst. Dies ist deutlich bei Mischung T42 ersichtlich, die 40kg Mikrosilika (Slurry) und 50 kg Dol 1.0 enthält. Besonders auffallend ist der Eco-SCC (T41). Die Treibhausgasemissionen betragen lediglich 52%, der Primärenergiebedarf lediglich 51% im Vergleich zur Ausgangsmischung. Auch der Preis beträgt durch die Zugabemittelreduktion und den niedrigen Bindemittelgehalt nur 72% des Preises der Ausgangsrezeptur.

5.6 Weitere Beobachtungen

5.6.1 Fließmittelabsorption

Es konnte beobachtet werden, dass Mischungen, die vom instabilen in den stabilen Zustand übergehen, eine gute Konsistenzhaltung aufweisen. Dies wurde unabhängig davon beobachtet, ob ein Konsistenzhalter in der Mischung ist. Das ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Fließmittelabsorption keine lineare Funktion ist. Dabei wird in den ersten Minuten nach der Fließmittelzugabe viel absorbiert, später weniger.

Um eine bessere Konsistenzhaltung zu erzielen könnte es deshalb sinnvoll sein, die erhöhte Fließmitteldosierung bereits nach 45 Sekunden zusammen mit dem Wasser durchzuführen. Dadurch könnte der Beton das Fließmittel bis zum Einbau über einen längeren Zeitraum absorbieren, was später zu einem geringeren Absorptionsvermögen und somit einer längeren Konsistenzhaltung führt. Um eine anfängliche Instabilität der Mischung zu vermeiden könnte die Dosierung auch in zwei oder mehreren Schritten erfolgen. Ebenfalls ist der Einsatz eines anderen Fließmitteltyps wie z.B. PCE mit einer geringeren Ladungsdichte denkbar [27].

5.7 Rezepturvorschlag SCC mit guten selbstverdichtenden Eigenschaften

Bei diesem Rezepturvorschlag spielt die Beständigkeit gegen lösenden Angriff keinen entscheidenden Faktor. Es wurde die Betonrezeptur T61 ausgewählt, die in Tabelle 5.13 hier nochmals angeführt ist. Sie verfügt über die Korngrößenverteilung mit 31% Grobkorn. Der Zementgehalt beträgt 358kg/m^3 , wodurch sich mit der Wassermenge von $199,6\text{kg/m}^3$ und 153kg/m^3 Hüttensand ein w/b Wert von 0,42 ergibt. Bei dieser Mischung kam der Mikrofüller Kal 1.0 zum Einsatz.

Bezeichnung		T61
Zement	[kg/m ³]	358
MS1	[kg/m ³]	-
Kal 1.0	[kg/m ³]	38
Dol 2.6	[kg/m ³]	-
HS1	[kg/m ³]	153
Wasser	[kg/m ³]	199,6
FM1	[kg/m ³]	2,1
KH1	[kg/m ³]	1,4
E1	[kg/m ³]	1,0
S 0/2	[kg/m ³]	302
S 0/4	[kg/m ³]	582
G 4/16	[kg/m ³]	845
w/b	[kg/m ³]	0,42

Tabelle 5.13: Rezepturvorschlag SCC mit guten selbstverdichtenden Eigenschaften

Die Mischung überzeugt vor allem durch die ausgezeichnete Konsistenz 10 Minuten nach Wasserzugabe. Außerdem konnten die Zusatzmittel im Vergleich zur Ausgangsrezeptur um 4,2 kg/m³ reduziert werden. Ebenfalls konnten über 60kg/m³ des Zementes im Vergleich zur Ausgangsmischung eingespart werden. Dadurch wurden die Treibhausgasemissionen um 16% und der Primärenergiebedarf um 14% im Vergleich zur Ausgangsmischung reduziert. Ebenfalls wurde der Preis der Rezeptur vor allem durch das Fehlen von Mikrosilika um 9% gesenkt. Die wesentlichen Parameter der Mischung sind in Tabelle 5.14 nochmals angeführt.

		T61	
Zeitpunkt	[min]	10	30
Fließmaß	[cm]	69	50
T ₅₀₀ -Zeit	[s]	2,5	10
Frühfestigkeit	[MPa]	-	
Endfestigkeit	[MPa]	90	
Konsistenzh.	[-]	0,73	
Luftporen	[%]	1,4	
Zusatzmittel	[kg/m ³]	4,5	

Tabelle 5.14: Parameter der Rezeptur T61

5.8 Rezepturvorschlag SCC mit hoher Beständigkeit gegen lösenden Angriff

Für diese Anforderung wurde die Betonrezeptur T54 ausgewählt, deren mengenmäßig aufgeschlüsselten Inhaltsstoffe nochmals in Tabelle 5.15 ersichtlich sind. Diese Rezeptur bietet mit ihrem hohen Anteil an Hüttensand und Mikrosilika eine hohe Resistenz gegen lösenden Angriff. Auch der niedrige w/b Wert von lediglich 0,40 sorgt für eine hohe

Gefügedichte. Diese Mischung verfügt über die Korngrößenverteilung mit 37% Grobkorn. Sie benötigt 5,8 kg/m³ Zusatzmittel, was im Vergleich zur Ausgangsrezeptur eine Reduzierung von 3,0 kg/m³ darstellt.

Bezeichnung		T54
Zement	[kg/m ³]	338
MS1	[kg/m ³]	40
Kal 1.0	[kg/m ³]	16
Dol 2.6	[kg/m ³]	-
HS1	[kg/m ³]	145
Wasser	[kg/m ³]	198,0
FM1	[kg/m ³]	3,0
KH1	[kg/m ³]	1,8
E1	[kg/m ³]	1,0
S 0/2	[kg/m ³]	250
S 0/4	[kg/m ³]	480
G 4/16	[kg/m ³]	1028
w/b	[kg/m ³]	0,40

Tabelle 5.15: Rezepturvorschlag SCC mit hoher Beständigkeit gegen lösenden Angriff

Auch bei dieser Mischung kam neben Mikrosilika noch der Mikrofüller Kal 1.0 zum Einsatz. Der Zementgehalt wurde im Vergleich zur Ausgangsmischung um über 80 kg/m³ verringert, was die verursachten Treibhausgasemissionen pro m³ zusammen mit der Zusatzmittelreduktion um 17% und den Primärenergiebedarf um 19% im Vergleich zur Ausgangsmischung reduziert. Der geschätzte Preis der Mischung ist dabei lediglich 3% höher als der der Ausgangsmischung. Das Fließmaß von 75cm 18 Minuten nach Wasserzugabe verleiht der Mischung zusammen mit ihrer plastischen Viskosität gute selbstverdichtende Eigenschaften. Diese Rezeptur verfügt mit 112,30 MPa außerdem über die höchste Druckfestigkeit nach 28 Tagen, welche sich durch die noch nicht abgeschlossene Hydratation des Hüttensandes mit zunehmendem Betonalter noch weiter erhöhen könnte. Die wesentlichen Parameter der Mischung sind in Tabelle 5.16 nochmals angeführt.

		T54	
Zeitpunkt	[min]	18	30
Fließmaß	[cm]	75	70
T ₅₀₀ -Zeit	[s]	2	2
Frühfestigkeit	[MPa]	17	
Endfestigkeit	[MPa]	112	
Konsistenzh.	[-]	0,93	
Luftporen	[%]	0,8	
Zusatzmittel	[kg/m ³]	5,8	

Tabelle 5.16: Parameter der Rezeptur T54

6 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden mittels einer Literaturrecherche verschiedene Ansätze des Mixdesigns für selbstverdichtenden Beton aufgezeigt. Für das angestrebte Anwendungsgebiet als Trinkwasserspeicher aus Betonfertigteilen wurde das Mixdesign nach Okamura, welches in seinen Grundzügen in Österreich praktiziert wird, in der Folge angewandt. Mit den entwickelten Rezepturen können passende Früh- und Endfestigkeiten, eine gute Konsistenz und eine starke Selbstentlüftung sowie ein hoher Widerstand gegen lösenden Angriff gewährleistet werden. Die Betonrezepturen wurden ausgehend von der Ausgangsrezeptur durch eine angepasste Korngrößenverteilung sowie durch den Einsatz von Eco- und Mikrofüllern verbessert. Bei der Erstellung der Betonrezepturen wurden die Vorgaben der Önorm B4710-1 sowie die Empfehlungen der Österreichischen Richtlinie für Selbst- und Leichtverdichtbaren Beton und der Europäischen Richtlinie für SCC berücksichtigt.

Das Ergebnis dieser Arbeit sind zwei Rezepturvorschläge. Die erste Rezeptur bietet verbesserte rheologische Eigenschaften im Vergleich zur Ausgangsmischung, die zweite zusätzlich eine Leimzusammensetzung, mit der hohe Beständigkeit gegen lösenden Angriff erreicht werden kann. Die Zusammensetzungen dieser Rezepturen sind in Kapitel 5.7 und 5.8, Tabelle 5.13 und Tabelle 5.15, dargestellt.

Im Zuge von Versuchsreihen im Labor konnte die Korngrößenverteilung ausgehend von der Ausgangsrezeptur optimiert werden. So kamen bei den beiden Rezepturvorschlägen Korngrößenverteilungen mit mehr Grobkornanteil zum Einsatz. Um die Leimzusammensetzung im Hinblick auf die Rheologie sowie die Beständigkeit gegen lösenden Angriff zu optimieren, wurde der inerte Füller (Gesteinsmehl Ecofüller Dol 16.5) durch Hüttensand ersetzt. Dies sorgt zusammen mit dem verwendeten C_3A -freien Zement für einen resistenten Bindemittelleim. Durch den Einsatz von Hüttensand konnten die hydraulisch wirksamen Anteile im Beton erhöht werden, wodurch es zu einer Reduktion des w/b Wertes von 0,43 auf 0,40 bzw. 0,42 kam. Um die Stabilität der Mischungen zu gewährleisten, kam ein sehr feiner Füller (Gesteinsmehl Mikrofüller Kal 1.0) zum Einsatz. Durch die eben angeführten Veränderungen der Betonzusammensetzung konnte für beide Rezepturvorschläge eine Verbesserung der Konsistenz sowie eine deutliche Zusatzmittelreduktion erzielt werden. Ebenfalls konnten durch den teilweisen Ersatz des Zementes durch Hüttensand für beide Mischungen geringere Treibhausgasemissionen und ein geringerer Primärenergiebedarf im Vergleich zur Ausgangsrezeptur erreicht werden.

Durch die Auslagerung einiger Probekörper in Essigsäure (pH= 4,0-4,5) konnte gezeigt werden, dass Betonrezepturen mit der karbonatischen Gesteinskörnung nicht für ein Milieu der Expositionsklasse XA3L geeignet sind. Der auf theoretischer Basis gegen lösenden Angriff optimierte Leim der Rezepturen sollte in Zukunft mit einer geeigneten Gesteinskörnung weiter untersucht werden.

Mit dem isländischen Eco-SCC wurde darüber hinaus eine Rezeptur mit lediglich 209 kg/m³ Zement (im Vergleich zu 420 kg/m³ der Ausgangsrezeptur) untersucht, die gute selbstverdichtende Eigenschaften aufwies, aufgrund der geringen Frühfestigkeit jedoch nicht

für den Einsatz im Fertigteilwerk geeignet war. Diese Mischung hat zudem einen sehr geringen Zusatzmittelbedarf und könnte zukünftig für alternative Einsatzgebiete eine geeignete Lösung darstellen.

Die angestrebte sehr gute Selbstentlüftung konnte durch sehr fließfähige Mischungen mit geringer Viskosität (bzw. T_{500} -Zeit) und mit verringerter Fließmitteldosierung erreicht werden (Frischbetonluftgehalte $<1\%$). Eine Verbesserung der Fließfähigkeit wiederum konnte durch entsprechende Sieblinie (hoher Grobkornanteil) und Optimierung des Mehlkorns (Hüttensand statt Dolomitsteinmehl) neben einer höheren Fließmitteldosierung erreicht werden. Dabei wird allerdings sehr bald die Grenze der Frischbetonstabilität erreicht und der Beton neigt zum Bluten und zur Entmischung. Mit Hilfe eines sehr feinen Kalksteinmehls kann die Stabilität wieder hergestellt werden.

Für die Beständigkeit gegen lösenden Angriff ist neben der Verwendung latent-hydraulischer (Hüttensand) oder puzzolanischer (Mikrosilika) Zusatzstoffe die Auswahl beständiger Gesteinskörnung entscheidend.

Literaturverzeichnis

- [1] Okamura H. und Ouchi M., „Self-Compacting Concrete“, *Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 1*, pp. 5-15, April 2003.
- [2] Self-Compacting Concrete European Project Group, „The European Guidelines for Self-Compacting Concrete“, Mai 2005, URL: www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf, Zugriff: 09.03.2017.
- [3] Ouchi M., Nakamura S., Osterson T., Hallberg S.E. und Lwin M., „Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States“, in *ISHPC*, 2003.
- [4] Österreichisches Normungsinstitut, „ÖNORM B 4710-1“, Wien, 2007.
- [5] Wallevik O.H., „Rheology-my way of live“, in *36. Conference in our world in concrete & structures*, Singapore, 14.-16. August 2011.
- [6] Wallevik O.H., „Concrete around the world“, in *31. Conference on our world in concrete & struktues*, Singapoore, 16.-17. August 2006.
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, „Richtlinie Selbstverdichtender Beton“, Berlin, 2012.
- [8] Österreichische Bautechnik Vereinigung, „Richtlinie Selbst- und Leichtverdichtbarer Beton“, Wien, 2012.
- [9] Wallevik O.H., Mueller F.V., Hjartarson B. und Kubens S., „The green alternative of self compacting concrete, Eco-SCC“, in *35. Conference on our world in concrete & struktues*, Singapore, 25.-27. August 2010.
- [10] Mueller F.V., „Design criteria for low binder Self-Compacting Concrete, Eco SCC“, Reykjavik University, Diss., Mai 2012.
- [11] Okamura H., „Self-compacting high-performance concrete“, 1996.
- [12] Okamura H. und Ozawa K., „Mix design of self-compacting concrete“, *Proc. of JSCE*, Bd. 24/No. 496, pp. 107-120, 08. 1994, übersetzt am 25. Juni 1995.
- [13] Okamura H. und Ozawa K., „Self-compactable concrete for bridge construction“, in *International Workshop on Civil Infrastructural Systems-Application of Intelligent Systems and Advanced Materials on Bridge Systems*, Taiper Taiwan, 1994.
- [14] Wallevik O. H., Bager D. H., Hjartarson B. und Wallevik J. E., „Environmentally Friendly Concrete - Eco-Crete“, in *International Symposium on Environmentally Friendly Concrete - ECO-Crete*, Reykjaviv, Iceland, 2014.
- [15] Juhart J., David G.A., Baldermann C., Fischer G.F., Krischey E. und Mittermayr F., „A novel approach to increase the efficiency and eco-friendliness of cementitious composites“, *CEMCON*, 2016 (submitted).
- [16] Juhart J., David G.A., Nickel C., Fischer G. und Mittermayr F., „Ökologisch optimierter Beton: Stoffauswahl und Methoden der Rezepturentwicklung“, *Tagungsband des 2. Grazer Betonkolloquiums*, 2014.

- [17] Koehler E. P., „Aggregates in Self-consolidating Concrete“, University of Texas, PhD thesis, Austin, 2007 nach [10].
- [18] Brouwers H.J.H. und Radix H.J., „Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study“, *Cement and Concrete Research*, Bd. 11, Nr. 35, pp. 2116-2136, 2005 nach [10].
- [19] Brouwers H.J.H. und Radix H.J., „Erratum to"Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study“, *Cement and Concrete Research*, Bd. 9, Nr. 37, p. 1376, 2007 nach [10].
- [20] Brouwers H.J.H., „New developments with respect to concrete, pp 1-30“, in *ICCBT 2008*, Kuala Lumpur, 2008 nach [10].
- [21] Dillig C., Peyerl M., Krispel S. und Hüngsberg A., „Lösender Angriff auf Beton“, *zement + beton*, Bd. 01_16, pp. 68-71, 2016.
- [22] Z. Jiake, „Investigation of deterioration of joints in concrete pavements“, Iowa State University, Ames, Iowa, 2013.
- [23] Tritthart J., „Betontechnologie VU“, Graz: Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, 2006.
- [24] Stark J. und Wicht B., „Dauerhaftigkeit von Beton“, Springer-Verlag, 2013.
- [25] Thienel K.-Ch., „Dauerhaftigkeit von Beton“, München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, 2011.
- [26] Keil F., „Zement: Herstellung und Eigenschaften“, Springer-Verlag, 1971.
- [27] Schmidt W., „Wirkungsweise verschiedener Fließmittel“, *BWI - BetonWerk International*, Nr. 3/2015, pp. 44-48, 2015.
- [28] Schmidt M. und Slowik V., „Kapillare Schwindrissbildung in Beton“, Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2010.
- [29] Benedix R., "Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten", 4. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [30] Grübl P., Weigler H. und Karl S., „Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften“, Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaft GmbH, 2001.
- [31] Friebert M., „Der Einfluss von Betonzusatzstoffen auf die Hydratation und Dauerhaftigkeit selbstverdichtender Betone“, Göttingen: Cuvillier Verlag Göttingen, 2005.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Einbringen von SCC in einem Fertigteilwerk [2]	2
Abbildung 2.1: Idealisierter Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Scherrate nach Bingham [5].....	4
Abbildung 2.2: Fließkurven von Normalbeton, Hochfestem Beton und SCC [6].....	5
Abbildung 2.3: Einfluss verschiedenster Materialien auf die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons [6].....	5
Abbildung 2.4: Einfluss der Gesteinskörnung auf das Verhalten des Frischbetons [5].....	6
Abbildung 2.5: Empfohlener Bereich für SCC [5].....	6
Abbildung 2.6: Betonage eines Damms in Deutschland im Jahre 1920 [6]	7
Abbildung 2.7: Gegenüberstellung von Normalbeton der nordischen Länder [6].....	8
Abbildung 2.8: Vorgeschlagener Bereich für SCC [6]	9
Abbildung 2.9: Verarbeitbarkeitsbereich eines Selbstverdichtenden Betons [7].....	9
Abbildung 2.10: Rheologische Eigenschaften von SCC nach der Praxis in verschiedenen Nationen, Inhalt aus [6].....	10
Abbildung 2.11: Leimvolumen der verschiedenen Betonrezepturen [9]	11
Abbildung 2.12: Vergleich der Rheologie verschiedener Betone [9] grün: Eco-SCC; orange: NO; rot: DK; gelb: SE; blau: D	12
Abbildung 2.13: Fließmaß der Betone nach 3s und 70s [9]	12
Abbildung 2.14: Vergleich der Inhaltsstoffe von SCC und konventionellen Beton [1].....	13
Abbildung 2.15: Methoden um selbstverdichtenden Beton zu erhalten [1].....	13
Abbildung 2.16: Schema der SCC-Zusammensetzung, Inhalt aus [11].....	14
Abbildung 2.17: Zusammenhänge für SCC [12].....	14
Abbildung 2.18: Fließmaß zur Bestimmung der Verformbarkeit und V-Trichter-Test zur Bestimmung der Viskosität [1]	15
Abbildung 2.19: Kornverteilungen der isländischen Betonrezepturen [9] und der „B“-Sieblinie nach Önorm B 4710-1, GK 16 [4]	16
Abbildung 2.20: Effekt von Füllern und Fließmittel [16].....	19
Abbildung 2.21: Zusammenhang zwischen Fließmaß und Leimvolumen mit verschiedener plastischer Viskosität [10]	22
Abbildung 2.22: Übergangszone zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix [22].....	23
Abbildung 2.23: Übersicht lösender Angriff.....	24
Abbildung 2.24: Formen der Kohlensäure [25]	26

Abbildung 3.1: Beziehung zwischen freiem Wasser zu Sandanteil und Fließfläche, Inhalt aus [12].....	27
Abbildung 3.2: Verhältnis zwischen Wasser/Mehlkornanteil und relativer Fließfläche, Inhalt aus [12]	29
Abbildung 3.3: Zusammenhang zwischen w/b Wert und Schubspannung vom Leim [11]	29
Abbildung 3.4: Kornverteilung des Zementes und der hydraulischen Zusatzstoffe	30
Abbildung 3.5: Steinkohlenflugasche unter dem Elektronenmikroskop [28]	31
Abbildung 3.6: Beispiele verschiedener chemischer Zusammensetzungen von Flugasche [10]	32
Abbildung 3.7: Korngrößenverteilung der Dolomit- und Quarzmehle	33
Abbildung 3.8: Quarzmehl unter dem Elektronenmikroskop [28]	33
Abbildung 3.9: Verhältnis der Bestandteile von Beton [12]	34
Abbildung 3.10: Wasseraufnahme des Leims in Bezug auf dessen Feststoffanteil [12]	35
Abbildung 3.11: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen.....	35
Abbildung 3.12: Einfluss des Fließmittels auf den Frischbeton [1]	36
Abbildung 3.13: Effekt von Fließmittel [12].....	37
Abbildung 4.1: Zyklus Gleichlaufmischer	40
Abbildung 4.2: Prüfkonus auf Metallplatte.....	41
Abbildung 4.3: Aufbau Druckfestigkeitsprüfung	42
Abbildung 4.4: Aufbau Dreipunkt-Biegeversuch.....	43
Abbildung 4.5: Aufbau Essigsäureprüfung.....	43
Abbildung 4.6: Korngrößenverteilung der Ausgangsrezeptur.....	44
Abbildung 4.7: Ausbreitungsmaß Ausgangsrezeptur (58cm)	46
Abbildung 4.8: Korngrößenverteilung der untersuchten Mischungen	49
Abbildung 5.1: Fließmaß von jeweils 76cm der Mischungen T11 links und T12 rechts, 30 Minuten nach Wasserzugabe	52
Abbildung 5.2: Beziehung zwischen Fließmaß und T_{500} -Zeit.....	53
Abbildung 5.3: Fließmaß der Mischungen T21 links (13Min; 62cm); T22 mitte (50Min; 70,5cm); T23 rechts (52Min; 66,5cm).....	54
Abbildung 5.4: Beziehung zwischen Fließmaß und T_{500} -Zeit.....	55
Abbildung 5.5: Beziehung zwischen Fließmaß und T_{500} -Zeit.....	56
Abbildung 5.6: Fließmaß der Mischungen T31 links (46Min; 70 cm); T32 mitte (47Min; 64cm); T33 rechts (45Min; 67cm).....	57

Abbildung 5.7: Fließmaß der Mischungen T43 links (45Min; 73 cm); T54 mitte (30Min; 70cm); T61 rechts (10Min; 69cm).....	59
Abbildung 5.8: Beziehung zwischen Fließmaß und T_{500} -Zeit.....	59
Abbildung 5.9: Druckfestigkeiten der untersuchten Betonmischungen nach 24 Stunden und 28 Tagen (7 Tagen).....	61
Abbildung 5.10: Verbesserung der Beständigkeit gegen lösenden Angriff; Inhalt aus [21]....	62
Abbildung 5.11: Probekörper der Rezepturen (von oben) T21, T22, T23, T31.....	64
Abbildung 5.12: Probekörper der Rezepturen (von oben) T32, T33, T54.....	65
Abbildung 5.13: Ergebnisse der Essigsäurelagerung	66
Abbildung 5.14: Probekörper der Rezeptur T61 nach der Essigsäurelagerung.....	66
Abbildung 5.15: Fließmaß von 64 cm nach 13 Minuten	68
Abbildung 5.16: Korngrößenverteilung des Eco-SCC	68
Abbildung 5.17: GWP, PE und Preis der untersuchten Mischungen.....	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vergleich typischer Mischverhältnisse von SCC in verschiedenen Nationen; Daten aus [6]	10
Tabelle 2.2: Betonzusammensetzung für SCC in verschiedenen Nationen und für „ECO“ [9]	11
Tabelle 2.3: Typische Mischung Mixdesign nach Okamura [13]	15
Tabelle 2.4: Typische Mischung Mixdesign nach dem isländischen Konzept [14].....	17
Tabelle 2.5: Übersicht verschiedener Säuren, Daten aus [25]	25
Tabelle 4.1: Erforderliches Fließmaß laut ÖBV Richtlinie für SCC [8].....	38
Tabelle 4.2: Mischabfolge im Zyklus Gleichlaufmischer.....	40
Tabelle 4.3: Ausgangsrezeptur des Industriepartners.....	44
Tabelle 4.4: Ergebnisse der Vorversuchsreihe	45
Tabelle 4.5: Ausgangsrezeptur der Masterarbeit	46
Tabelle 4.6: Mischungen zur Untersuchung des Zusatzmittelverhältnisses	47
Tabelle 4.7: Gegenüberstellung der empfohlenen und vorhandenen Richtwerte nach Okamura	48
Tabelle 4.8: Rezepturen zur Untersuchung der Korngrößenverteilung	48
Tabelle 4.9: Rezepturen zur Untersuchung der Ecofüller.....	50
Tabelle 4.10: Rezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Mikrofüller 1	50
Tabelle 4.11: Rezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Mikrofüller 2	51
Tabelle 5.1: Rezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Zusatzmitteldosierung	52
Tabelle 5.2: Parameter der untersuchten Mischungen.....	53
Tabelle 5.3: Rezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Korngrößenverteilung.....	54
Tabelle 5.4: Parameter der untersuchten Mischungen.....	55
Tabelle 5.5: Rezepturen der dritten Versuchsserie	56
Tabelle 5.6: Parameter der untersuchten Mischungen.....	57
Tabelle 5.7: Mischungsrezepturen zur Untersuchung des Mikrofüllers 1	58
Tabelle 5.8: Mischungsrezepturen zur Untersuchung des Mikrofüllers 2	58
Tabelle 5.9: Parameter der untersuchten Mischungen.....	60
Tabelle 5.10: Auf Beständigkeit gegen lösenden Angriff getestete Rezepturen	63
Tabelle 5.11: Mischungsrezeptur des untersuchten Eco-SCC	67
Tabelle 5.12: Datenbasis zur Ermittlung von GWP, PE und Preis	69

Tabelle 5.13: Rezepturvorschlag SCC mit guten selbstverdichtenden Eigenschaften	71
Tabelle 5.14: Parameter der Rezeptur T61.....	71
Tabelle 5.15: Rezepturvorschlag SCC mit hoher Beständigkeit gegen lösenden Angriff.....	72
Tabelle 5.16: Parameter der Rezeptur T54.....	72

Anhang A – Datenblätter

Karawanken Zement

Portlandzement CEM I 42,5 R – SR 0 WT 27 C₃A-frei

Produkt	Portlandzement gemäß ÖNORM EN 197-1 und ÖNORM B 3327-1, hergestellt im Werk Wietersdorf der w&p Zement GmbH.
Zusammensetzung	Portlandzementklinker C ₃ A-frei, Gips,
Anwendung	Portlandzement mit stark erhöhtem Widerstand gegen Sulfatangriff für alle üblichen Betonanwendungen und für Betone in allen Expositionsklassen. Besonders geeignet für Bauwerke und Bauteile, die mit sulfathaltigen Böden und Wässern in Berührung kommen. Vorteilhaft für Anwendungen, bei denen eine geringe Wärmeentwicklung erforderlich ist, wie z.B. Tunnelinnenschalen oder Weiße Wannen. Gut geeignet für Spezialanwendungen im landwirtschaftlichen Bau.
Eigenschaften	Gute Verarbeitbarkeit durch günstigen Wasseranspruch und mäßige Wasserabsonderung. Günstige Festigkeitsentwicklung, wie gute Frühfestigkeit und Nacherhärtung. Stark erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen Sulfatangriff und niedrige Wärmeentwicklung. Die Betoneigenschaften, vor allem auch das Zusammenwirken aller Betonbestandteile ist in Prüfungen nachzuweisen. Für eine optimale Betonqualität ist eine gute Verdichtung und Nachbehandlung besonders zu beachten.
Technische Daten	<p>Druckfestigkeit bei Normenprüfung nach ÖNORM EN 196</p> <p>1 Tag ca. 13 N/mm² 2 Tage ca. 25 N/mm² 28 Tage ca. 56 N/mm²</p> <p>Erstarrungsbeginn ca. 210 min Mahlfeinheit ca. 3800 cm²/g Hydratationswärme ca. 24 K Temperaturanstieg nach ÖNORM B 3303</p> <p>Wasserabsonderung ca. 10 ml (2 h) nach ÖNORM B 3303 C₃A-frei (SR0) gemäß ÖNORM EN 197-1 Chromatarm gemäß Verordnung (EG) Nr.1907/2006 Dichte ca. 3,17 cm³/g</p>
Lieferform	Sack 25 kg Lose im Silowagen oder Bahnwaggon
Lagerung	Sackware vor Feuchtigkeit geschützt max. 3 Monate lagerfähig, loses Material maximal 1 Monat lagerfähig.
Qualitätssicherung	Konformitätsnachweise durch interne Überwachungsprüfungen. Kennnummer der Zertifizierungsstelle 2523-CPR-0089.

Unsere anwendungstechnischen Empfehlungen in Wort und Schrift, die wir zur Unterstützung des Käufers/Verarbeiters aufgrund unserer Erfahrungen, entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand in Wissenschaft und Praxis geben, sind unverbindlich und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis und keine Nebenverpflichtung aus dem Kaufvertrag. Sie entbinden den Käufer nicht davon, unsere Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck in eigener Verantwortung selbst zu prüfen.

Sicherheitsdatenblatt anfordern bzw. beachten

Stand: Jänner 2015

w&p Zement GmbH - Wir schaffen und erhalten Werte

A-9373 Klein St. Paul, Wietersdorf 1
A-8120 Peggau, Alois-Kern-Straße 1

Tel.: 04264/3131-0
Tel.: 03127/201-0

Fax: 04264/3131-1269 e-mail: wietersdorf@zement.wup.at
Fax: 03127/201-2361 e-mail: peggau@zement.wup.at

www.zement.wup.at

MasterGlenium ACE 331

Bisher: Glenium® ACE 331

Zero Energy System - neue Generation von Fließmitteln auf Basis Polycarboxylat - chloridfrei; Fließmittel für Beton gem. ÖNORM EN 934-2:2012; Tab. 3.1 und 3.2 (FM)

PRODUKTBESCHREIBUNG

MasterGlenium ACE 331 ist eine Innovation im Bereich der Fließmittel auf Basis eines Polycarboxylethers. Die neuartige Molekülstruktur bewirkt, dass eine größere für die Hydratationsreaktion verfügbare Oberfläche der Zementpartikel zur Verfügung steht. Zusätzlich erfolgt eine sehr rasche Adsorption der Moleküle durch die Zementpartikel und ein außerordentlich effizienter Dispersionseffekt (elektrostatische Stabilisierung)

Die Summe dieser Effekte bewirkt eine frühere Hydratationsreaktion, die dabei erfolgende Wärmeentwicklung wird effizienter ausgenutzt und es resultiert eine deutlich raschere Frühfestigkeitsentwicklung des Betons.

ZERO ENERGY SYSTEM:

Das System basiert auf der Kombination vom MasterGlenium ACE 331 und MasterMatrix SCC, der neuesten Technologie des Rheodynamischen Betons (selbstverdichtender Beton ohne Entmischungsneigung).

Das Zero Energy System wurde entwickelt, um den Prozess bei der Produktion von Betonfertigteilen zu rationalisieren sowie Energiekosten zu senken bei verbesserten Produkten und Arbeitsbedingungen. Verdichtungsenergie kann eingespart werden und Heizkosten bzw. die Aushärtungszeiten können deutlich reduziert werden.

ACE - Admixture Controlled Energy - Zusatzmittelgesteuerte Energieoptimierung.

ANWENDUNGSGEBIETE

- Fertigteilwerk

VORTEILE

- sehr gute Verflüssigungseigenschaften
- neuartige Molekülstruktur
- deutlich höhere Frühfestigkeiten des Betons
- verbesserte Betoneigenschaften
- hohes Energieeinsparungspotential
- Verkürzung der Aushärtungszeiten
- Verkürzung der Ausschulfristen

- Reduzierung der Wärmebehandlung
- Einsatz weniger reaktiver Zementsorten möglich

In Kombination mit GLENIUM STREAM

- hervorragendes Zusammenhaltevermögen des Betons
- verminderte Entmischungsneigung
- verminderte Neigung zur Wasserabsonderung (Bluten)
- positiver Einfluß auf die Sichtflächen (Sichtbeton)

VERARBEITUNG

MasterGlenium ACE 331 im Zwangsmischer nach Beendigung der Mischwasserzugabe beigegeben. Mindestmischdauer 1 Minute.

Nicht in die trockene Mischung dosieren.

Für eine optimierte Umsetzung des Potentials des Zusatzmittels muß die Betontemperatur über +15° C liegen.

Hinweis: Nicht möglich ist eine Kombination von MasterGlenium ACE 331 mit Fließmittel oder Verflüssiger, welche Naphthalin enthalten.

HINWEISE

Fördertechnik:

Beim Fördern mit Pumpen, die konstruktionsbedingt eine hohe Scherwirkung aufbauen, können Fließmittel auf Basis Polycarboxylat in ihrer Molekülstruktur verändert werden, was negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Zusatzmittels haben kann. Fliehkraftpumpen (Kreiselpumpen, Stabpumpen, Tauchpumpen) werden zum Fördern von Fließmitteln auf Basis Polycarboxylat nicht empfohlen. Verdrängerpumpen (Membranpumpen, Zahnradpumpen, Schlauchquetschpumpen, Exzentrerschneckenpumpen, Impellerpumpen) bewirken geringere Scherwirkung im Fördermedium, und werden daher zum Fördern von Fließmittel auf Polycarboxylatbasis empfohlen.

Geruch und Farbe:

Einige Basisrohstoffe, die für die Herstellung von Zusatzmitteln verwendet werden, können ein breites

MasterGlenium ACE 331

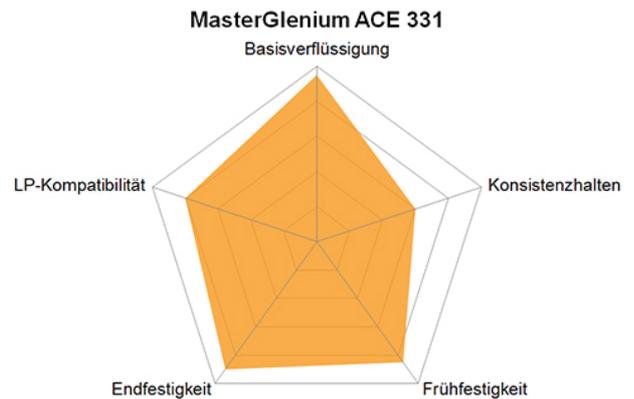
Bisher: Glenium® ACE 331

Zero Energy System - neue Generation von Fließmitteln auf Basis Polycarboxylat - chloridfrei; Fließmittel für Beton gem. ÖNORM EN 934-2:2012; Tab. 3.1 und 3.2 (FM)

Spektrum an Geruchs- und Farbvariationen aufweisen, da es sich zum Teil um natürliche Ausgangsstoffe handelt.

Der unterschiedliche Geruch und die unterschiedliche Farbe haben nachweislich keinen Einfluss auf die produktspezifische Wirkung im Beton oder Mörtel. BASF Performance Products GmbH garantiert eine absolut gleichbleibende Wirkung der gelieferten Zusatzmittel. BASF Performance Products GmbH Zusatzmittel unterliegen diesbezüglich einer Eigenüberwachung gemäß EN 934-2, die von einer externen autorisierten Prüfstelle fremdüberwacht wird.

Bei der Kombination von Fließmittel auf Basis Polycarboxylat und Ferroxon-Farbpigmenten kann es zu einem erhöhten Anteil an künstlichen Luftporen im Frischbeton kommen.



DOSIERUNG

Empfohlene Dosierung:
0,3 % - 1,0 % vom ZG

SICHERHEITSHINWEISE

Gefahren-, Sicherheits- und Entsorgungshinweise entnehmen Sie bitte dem EG-Sicherheitsdatenblatt und der Gebindeetikette.

VERARBEITUNGSTEMPERATUR UND LAGERBEDINGUNGEN

für Temperaturbereich von +15° C bis +30° C
1 Jahr lagerfähig
bei +5° C bis +30° C lagern
vor Gebrauch homogenisieren; gefrorenes Material langsam erwärmen und homogenisieren

LIEFERFORM

Artikelnummer

K 25 kg	51205726
F 220 kg	51205673
C 1000 kg	51205620
TW	51205779

MasterGlenium ACE 331

Bisher: Glenium® ACE 331

Zero Energy System - neue Generation von Fließmitteln auf Basis Polycarboxylat - chloridfrei; Fließmittel für Beton gem. ÖNORM EN 934-2:2012; Tab. 3.1 und 3.2 (FM)

Produkt-Daten	
Form	flüssig
Farbe	braun
Dichte	1,07 g/cm ³ +/-0,02 bei +20 °C
pH-Wert	5 - 7

TM-Nr: 801 Ausgabe 09.11.2013

Rechtlicher Hinweis

Dieses technische Datenblatt dient, wie unsere sonstigen technischen Hinweise und Auskünfte, lediglich zur Beschreibung der Beschaffenheit dieses Produktes, seiner Verarbeitungs- und Anwendungsmöglichkeiten. Es hat aber nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften des Produktes oder dessen Eignung für einen Einsatzzweck zuzusichern, und die Beschreibung enthält auch keine vollständige Gebrauchsanweisung. Da wir uns Änderungen unserer technischen Datenblätter vorbehalten, obliegt es den Kunden, sicherzustellen, daß das jeweils aktuelle technische Datenblatt vorliegt. Aktuelle technische Datenblätter können in allen unseren Standorten angefordert werden oder von unserer Webseite www.basf-cc.at, in der Kategorie "Produkte", per Download bezogen werden. Darüber hinaus gelten unsere aktuellen allgemeinen Geschäftsbedingungen.

BASF Performance Products GmbH - Geschäftsbereich Betonzusatzmittel

A-8670 Krieglach, Roseggerstraße 101, Tel: 03855/2371, office.austria@basf.com, www.master-builders-solutions.basf.at, Notfallauskunft:+491802273112

MasterFinish DF 370

Bisher: DCC-Entlüfter

Entlüfter für Frischbeton

PRODUKTBESCHREIBUNG

MasterFinish DF 370 ist ein flüssiges Betonzusatzmittel mit stark entlüftender Wirkung im Frischbeton.

Die Tendenz, die im Frischbeton vorliegende Grob- und Feinluft auszutreiben, wird durch die spezielle Wirkung des Zusatzmittels stark erhöht.

Der Frischbeton entlüftet beim Einsatz von MasterFinish DF 370 bereits während des Mischvorganges gut, und in der Folge wird auch beim Einbau des Frischbetons und beim Verdichtungsvorgang die Entlüftung unterstützt und verbessert.

ANWENDUNGSGEBIETE

- Fertigteilwerk
- porenarmer Sichtbeton
- Faserbeton

VORTEILE

- bessere Entlüftung des Frischbetons
- porenarme Sichtflächen
- weniger Luftblasen auf geglätteten Frischbetonflächen
- entlüftet unerwünschte LP in PP-Faserbeton

VERARBEITUNG

Wir empfehlen, MasterFinish DF 370 mit dem Mischwasser im Zwangsmischer bei der Herstellung des Frischbetons zuzugeben.

DOSIERUNG

Empfohlener Dosierbereich:
0,75 bis 1 kg/m³ Frischbeton

HINWEISE

Beim Einsatz von MasterFinish DF 370 in Kombination mit MasterGlenium-Fliessmittel kann die verflüssigende Wirkung des Fliessmittels deutlich verstärkt werden. MasterFinish DF 370 selbst wirkt nicht verflüssigend.

MasterFinish DF 370 kann nicht in Kombination mit luftporenbildenden Zusatzmittel für die Herstellung von Beton mit künstlichen Luftporen eingesetzt werden.

Wenn der Betonmischer nach der Herstellung von Beton mit MasterFinish DF 370 nicht ausgewaschen wird, kann bei einer nachfolgenden Produktion von Beton mit künstlichen Mikroluftporen der Luftporengehalt verringert sein. Ab der zweiten Mischcharge tritt diese entlüftende Wirkung normalerweise nicht mehr auf.

Auch beim Einsatz von MasterFinish DF 370 kann nicht davon ausgegangen werden, dass in jedem Fall eine lunkerfreie oder lunkerarme Sichtbetonoberfläche resultiert. Der Anteil an Verdichtungsporen auf Betonsichtflächen hängt naturgemäß sehr von der angewendeten Verdichtungstechnologie ab.

SICHERHEITSHINWEISE

Gefahren-, Sicherheits- und Entsorgungshinweise entnehmen Sie bitte dem EG-Sicherheitsdatenblatt und dem Gebindeetikett.

LAGERBEDINGUNGEN

1 Jahr lagerfähig
bei +5° C bis +30° C lagern
Vor Gebrauch homogenisieren. Da das Produkt zum Ausgasen neigt, ist für ausreichende Entlüftung der Lagerbehälter zu sorgen!

LIEFERFORM

Artikelnummer

K 25 kg	51204348
F 220 kg	51204295
C 1000 kg	

MasterFinish DF 370

Bisher: DCC-Entlüfter

Entlüfter für Frischbeton

Produkt-Daten	
Form	Emulsion milchig-trüb
Farbe	gelblich
Dichte	1,04-1,08 bei +20 °C
pH-Wert	5-7

TM-Nr: 768 Ausgabe 29.10.2013

Rechtlicher Hinweis

Dieses technische Datenblatt dient, wie unsere sonstigen technischen Hinweise und Auskünfte, lediglich zur Beschreibung der Beschaffenheit dieses Produktes, seiner Verarbeitungs- und Anwendungsmöglichkeiten. Es hat aber nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften des Produktes oder dessen Eignung für einen Einsatzzweck zuzusichern, und die Beschreibung enthält auch keine vollständige Gebrauchsanweisung. Da wir uns Änderungen unserer technischen Datenblätter vorbehalten, obliegt es den Kunden, sicherzustellen, daß das jeweils aktuelle technische Datenblatt vorliegt. Aktuelle technische Datenblätter können in allen unseren Standorten angefordert werden oder von unserer Webseite www.basf-cc.at, in der Kategorie "Produkte", per Download bezogen werden. Darüber hinaus gelten unsere aktuellen allgemeinen Geschäftsbedingungen.

BASF Performance Products GmbH - Geschäftsbereich Betonzusatzmittel

A-8670 Krieglach, Roseggerstraße 101, Tel: 03855/2371, office.austria@basf.com, www.master-builders-solutions.basf.at, Notfallauskunft: +491802273112

MasterSure 911

Bisher: Glenium® SKY 911

**Konsistenzhalter auf Basis Polycarboxylatether, modifiziert, chloridfrei;
Betonverflüssiger gem. ÖNORM EN 934-2:2012; Tab. 2 (BV)**

PRODUKTBESCHREIBUNG

Die einzigartige MasterGlenium SKY 911-Technologie ist die innovative dritte Generation von Betonzusatzmittel auf Basis Polycarboxylatether (PCE).

MasterSure 911 ist ausgelegt auf Konsistenzhaltung. Der Konsistenzhalter trägt nur sehr gering zur Anfangsverflüssigung bei. MasterSure 911 wird bei der Anwendung in Transportbeton in Kombination mit anderen MasterGlenium SKY-Fliessmittelformulierungen verwendet.

Die Wirkung des Konsistenzhalters beginnt etwa 15 – 25 min nach Zugabe, der Effekt hält bis deutlich über 90 min an.

Die zuverlässige Wirkung des Konsistenzhalters beruht auf der Umgehung des kritischen Zeitraums der ersten 10 min der Zementhydratation – Er „schaltet“ sich erst später dazu, wenn sich weitgehend stabile Hydratphasen gebildet haben.

Das Produkt ist praktisch immer in der Lage, das Ausbreitmaß zu konservieren und dem Rücksteifen wirkungsvoll entgegenzuwirken, z.B. bei:

- herausfordernden Zementen
- problematischen Gesteinskörnungen
- hohen Betontemperaturen
- hohen Restwasserdichten
- projektbezogenen Anwendungen
- lange Fahrstrecken / Fahrzeiten

MasterSure 911 in Kombination mit anderen Fliessmitteln der MasterGlenium SKY-Reihe ermöglicht die kompromisslose Umsetzung der "Rheodynamic™ Concrete Technology". Beton mit verarbeitungsfreundlicher Konsistenz über einen sehr langen Zeitraum, hoher Frühfestigkeit und hoher Endfestigkeit, mit optimierten Bindemittelgehalten.

Das "Total Performance Control™ Concept" stellt sicher, dass die Bedürfnisse und Vorgaben des Planers, des Transportbetonlieferanten und des Betonverarbeiters zielsicher und ohne Kompromisse eingehalten werden können.

ANWENDUNGSGEBIETE

- Transportbeton
- SCC - selbstverdichtender Beton (SVB)

VERARBEITUNG

MasterSure 911 im Zwangsmischer nach Beendigung der Mischwasserzugabe beigegeben. Mindestmischdauer 1 Minute. Nicht in die trockene Mischung dosieren.

MasterSure 911 trägt nur sehr gering zur Anfangsverflüssigung bei und muss daher beim Einsatz im Beton immer mit anderen Betonverflüssigern/Fliessmitteln der MasterGlenium- oder MasterGlenium SKY-Reihe kombiniert werden.

HINWEISE

MasterSure 911 ist kombinierbar mit den meisten Zusatzmitteln, die zur Herstellung hochwertiger Betone eingesetzt werden, wie z.B. Beschleuniger (Master X-Seed), Verzögerer und Sedimentations-reduzierer (MasterMatrix SDC). Bei der Kombination mit Luftporenbildnern empfehlen wir Vorversuche.

Die Verwendung in Kombination mit Zusatzmitteln anderer Hersteller kann zu nicht vorhersagbaren Ergebnissen führen. BASF Performance Products GmbH muss daher jegliche Verantwortung bzw. Gewährleistung für die Wirkung des Zusatzmittels für diese Fälle ablehnen.

Der Verlauf der Frischbeton-Konsistenzentwicklung kann über die Dosierung von MasterSure 911 gesteuert werden. Höhere Dosierungen können eine Nachverflüssigung bewirken, d.h. die Betonkonsistenz übersteigt die Ausgangskonsistenz (Frischbetonkonsistenz unmittelbar nach dem Mischvorgang).

Hinweis: Nicht möglich ist eine Kombination von MasterSure 911 mit Fließmittel oder Verflüssiger, welche Naphthalin enthalten.

Unsere Anwendungstechnik erstellt auf Wunsch eine Dosiermatrix, abgestimmt auf die aktuellen Betonausgangsstoffe und die angestrebten

MasterSure 911

Bisher: Glenium® SKY 911

**Konsistenzhalter auf Basis Polycarboxylatether, modifiziert, chloridfrei;
Betonverflüssiger gem. ÖNORM EN 934-2:2012; Tab. 2 (BV)**

Konsistenzhalte-Zeiten für unterschiedliche
Temperaturbereiche.

Fördertechnik:

Beim Fördern mit Pumpen, die konstruktionsbedingt eine hohe Scherwirkung aufbauen, können Zusatzmittel auf Basis Polycarboxylat in ihrer Molekülstruktur verändert werden, was negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Zusatzmittels haben kann.

Fliehkraftpumpen (Kreiselpumpen, Stabpumpen, Tauchpumpen) werden zum Fördern von Fließmitteln auf Basis Polycarboxylat nicht empfohlen.

Verdrängerpumpen (Membranpumpen, Zahnradpumpen, Schlauchquetschpumpen, Exzentrerschneckenpumpen, Impellerpumpen) bewirken geringere Scherwirkung im Fördermedium, und werden daher zum Fördern von Fließmitteln auf Polycarboxylatbasis empfohlen.

Bei der Kombination von Fließmittel auf Basis Polycarboxylat und Ferroxon-Farbpigmenten kann es zu einem erhöhten Anteil an künstlichen Luftporen im Frischbeton kommen.

DOSIERUNG

Empfohlene Dosierung:
0,1 % - 1,5 % vom Bindemittelgewicht.

Die erforderliche Dosierung ist durch Vorversuche zu ermitteln.

SICHERHEITSHINWEISE

Gefahren-, Sicherheits- und Entsorgungshinweise entnehmen Sie bitte dem EG-Sicherheitsdatenblatt und dem Gebindeetikett.

LAGERBEDINGUNGEN

1 Jahr lagerfähig
bei +5° C bis +30° C lagern
vor Gebrauch homogenisieren; gefrorenes Material langsam erwärmen und homogenisieren

LIEFERFORM

Artikelnummer

K 25 kg	50206861
F 220 kg	50206850
C 1000 kg	50206849

MasterSure 911

Bisher: Glenium® SKY 911

**Konsistenzhalter auf Basis Polycarboxylatether, modifiziert, chloridfrei;
Betonverflüssiger gem. ÖNORM EN 934-2:2012; Tab. 2 (BV)**

Produkt-Daten	
Form	flüssig
Farbe	grün
Dichte	1,04 g/cm ³ +/-0,02 bei +20 °C
pH-Wert	5,5 +/-1,0

TM-Nr: 1069 Ausgabe 06.11.2013

Rechtlicher Hinweis

Dieses technische Datenblatt dient, wie unsere sonstigen technischen Hinweise und Auskünfte, lediglich zur Beschreibung der Beschaffenheit dieses Produktes, seiner Verarbeitungs- und Anwendungsmöglichkeiten. Es hat aber nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften des Produktes oder dessen Eignung für einen Einsatzzweck zuzusichern, und die Beschreibung enthält auch keine vollständige Gebrauchsanweisung. Da wir uns Änderungen unserer technischen Datenblätter vorbehalten, obliegt es den Kunden, sicherzustellen, daß das jeweils aktuelle technische Datenblatt vorliegt. Aktuelle technische Datenblätter können in allen unseren Standorten angefordert werden oder von unserer Webseite www.basf-cc.at, in der Kategorie "Produkte", per Download bezogen werden. Darüber hinaus gelten unsere aktuellen allgemeinen Geschäftsbedingungen.

BASF Performance Products GmbH - Geschäftsbereich Betonzusatzmittel

A-8670 Krieglach, Roseggerstraße 101, Tel: 03855/2371, office.austria@basf.com, www.master-builders-solutions.basf.at, Notfalloauskunft:+491802273112

EMSAC 500SE

Silicasuspension für Beton nach EN 13263-1

ANWENDUNGSGEBIET

EMSAC 500SE ist ein hochwertiger puzzolanischer Betonzusatzstoff zur Herstellung von dichtem und dauerhaftem Beton. Haupteinsatzgebiet sind deshalb Betone, an deren Festigkeit, Wasserundurchlässigkeit, Widerstand gegen chemischen Angriff und somit Dauerhaftigkeit höchste Ansprüche gestellt werden. Für die Anwendung der EMSAC 500SE als Betonzusatzstoff gelten die Bestimmungen der DIN EN 206-1 / DIN 10452. Für Einpressmörtel nach DIN EN 447 ist die Verwendung von EMSAC 500SE nicht zulässig. Für Beton mit eingebettetem Spannstahl müssen die Bedingungen der DIN 1045-2 Tabelle 10 eingehalten werden.

PRÜFUNG / ZERTIFIKATE

Silicasuspension für Beton nach EN 13263-1

WIRKUNG

EMSAC 500SE ist eine wässrige Aufschlämmung mit ca. 50 % Mikrosilica-Trockenmasse. Mikrosilica ist bei guter Dispergierung ein sehr wirksamer Füller und reagiert intensiv mit dem Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus der Zementhydratation. Aufgrund seiner glasigen Beschaffenheit und sehr großen spezifischen Oberfläche (ca. $20 \text{ m}^2 / \text{g}$) ist Mikrosilica in zementgebundenen Systemen hochreaktiv. Im Festbeton trägt es zur Verbesserung der Dichtigkeit, der Festigkeit und des Widerstandes gegen chemischen und mechanischen Angriff bei. Im Frischbeton verbessert die Zugabe EMSAC 500SE den Zusammenhalt und das Wasserrückhaltevermögen der Mischung. Für die Herstellung von Hochleistungsbetonen mit niedrigen Wasser- / Zementwerten wird der Einsatz speziell angepasster Fließmittel, wie z.B. MasterGlenium ACE 30) empfohlen.

DOSIERUNG

Zulässige Zusatzmenge: 22 M.% vom Zementgewicht. Die erforderliche Zugabemenge sollte je nach Anforderung durch eine Erstrüfung festgelegt werden.

VERARBEITUNG

EMSAC 500SE sollte der Mischung entweder vor der Zement- oder nach der Wasserzugabe beigegeben werden. Die Gesamtmischzeit für Mikrosilica-Betone sollte erfahrungsgemäß mindestens 3 Minuten betragen.

LAGERBEDINGUNGEN

Vor Frost und Verunreinigung schützen. EMSAC 500SE muss durch regelmäßiges Umrühren homogen gehalten werden. Es wird empfohlen das Produkt vor jedem Einsatz, mindestens jedoch alle 2- 3 Wochen intensiv aufzurühren.

ARBEITSSCHUTZ / UMWELTVERHALTEN

EMSAC 500SE ist kein Gefahrstoff im Sinne der Richtlinie 1999/45/EG. Die im Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmaßnahmen wie z.B. Tragen von Schutzbrille und Schutzkleidung sind zu beachten. EMSAC 500SE ist schwach wassergefährdend, WGK = 1 (Selbsteinstufung nach den Regeln der VwVwS vom 17. Mai 1999). Sicherheitsdatenblatt ist zu beachten.

LIEFERUNG

Tankzug, Container 1.400 kg, Fass 220 kg,
Kanister 25 kg

EMSAC 500SE

Silicasuspension für Beton nach EN 13263-1

Produkt-Daten	
Rohstoffbasis	amorphes Siliciumdioxid, Wasser
Farbe und Lieferform	graue Suspension
Dichte (bei 20 °C)	1,40 kg/dm ³ ± 0,02 kg/dm ³
maximaler Chloridgehalt	0,3 M.%
Feststoffgehalt	50,0 ± 2 M.%

Stand: 12.02.2014 Kö

Rechtlicher Hinweis

Die Angaben in diesem Merkblatt sind nach bestem Wissen erstellt und stellen den derzeitigen Stand unserer Kenntnisse und Erfahrungen dar. Es handelt sich bei diesen Angaben allein um Produktbeschreibungen, in keinem Fall jedoch um Beschaffenheits- oder Haltbarkeitsgarantien. Der

Verarbeiter bleibt verpflichtet, eigene Untersuchungen und Prüfungen durchzuführen, um eine Verarbeitung und Anwendung unserer Produkte in seinem speziellen Geschäftsbereich zu verantworten. Mit Erscheinen dieses Merkblattes sind die vorausgegangenen Ausgaben ungültig.