



Dipl.-Ing. Christoph Maier, BSc.

Untersuchungen zur Optimierung der Mischtechnik von Ultrahochleistungsbeton

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Univ.-Doz. Bernhard Freytag

Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Santner

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.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,
date
(signature)

Anmerkung

In der vorliegenden Masterarbeit wird auf eine Aufzählung beider Geschlechter oder die Verbindung beider Geschlechter in einem Wort zugunsten einer leichteren Lesbarkeit des Textes verzichtet. Es soll an dieser Stelle jedoch ausdrücklich festgehalten werden, dass allgemeine Personenbezeichnungen für beide Geschlechter gleichermaßen zu verstehen sind.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Santner sowie beim gesamten Team des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Graz. Darüberhinaus bedanke ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Michael Huß vom Institut für Betonbau, der mir bei der Auswertung der Versuchsergebnisse behilflich war.

Ebenfalls bedanke ich mich bei den Firmen Skako Concrete, Wilhelm+Mayer Bau GmbH und MAT Mischanlagentechnik, die mir bei der Erstellung der Arbeit behilflich waren.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Kommilitonen Marco, Michl, Barry und Fex, mit denen ich viele schöne inner- wie auch außeruniversitäre Momente erleben durfte.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützte.

Graz, am 16.März 2017

(Unterschrift des Studenten)

Kurzfassung

Ultrahochleistungsbetone (UHPC) verfügen im Vergleich zu Normalbetonen über ein deutlich dichteres und nahezu kapillarporenfrees Betongefüge. Die dadurch geschaffene homogene und an Gefügestörungen arme Zementsteinmatrix sorgt sowohl für hohe Betonfestigkeiten (Druckfestigkeit $> 150 \text{ N/mm}^2$, Biegezugfestigkeit $> 15 \text{ N/mm}^2$) als auch für eine außerordentliche Dauerhaftigkeit und eröffnet für UHPC daher ein umfangreiches Anwendungsspektrum. Die besonderen Eigenschaften dieses Baustoffes ermöglichen etwa die Ausführung von schlankeren und weitgespannteren Tragwerken, wodurch einerseits die architektonische Wirkung steigt und andererseits die Baustoffmenge (Beton und Bewehrung) reduziert werden kann. Des Weiteren verfügen Bauteile aus UHPC im Vergleich zu Normalbeton aufgrund ihrer hohen Dichtigkeit über eine außerordentlich hohe Lebensdauer und verursachen somit bei mechanisch oder chemisch hoch belasteten Bauteilen bzw. Bauwerken wie beispielsweise bei Start- und Landebahnen von Flugplätzen, Klärbecken von Abwasserreinigungsanlagen oder Offshorebauwerken reduzierte Unterhaltskosten.

Die herausragenden Festbetoneigenschaften von UHPC sind neben der betontechnologischen Optimierung des Mischungsentwurfs (Ermittlung eines Korngemisches mit größtmöglicher Packungsdichte) und der Qualität der Nachbehandlung des jungen Betons wesentlich vom Mischvorgang bzw. von der Mischtechnik abhängig.

Ultrahochleistungsbeton erfordert aufgrund seiner besonderen Zusammensetzung (hoher Feinteilgehalt, niedriger Wasserbindemittelwert, Zugabe von Stahlfasern etc.) im Vergleich zu Normalbeton einen deutlich energie- und zeitintensiveren Mischvorgang um die feinen Betonausgangsstoffe im Mischbehälter zu verteilen und das Mischgut so zu homogenisieren. Derzeit übliche Mischanlagen verfügen jedoch häufig nicht über die notwendige Mischeffizienz und oder die erforderliche Leistungen, sodass die Herstellung von UHPC entweder gar nicht oder nur mit sehr langen Mischzeiten realisierbar ist.

Da sich die Mischzeit für Großprojekte aus UHPC entscheidend auf den Fertigungsfortschritt und somit ebenso auf die Bauzeit und die Baukosten auswirkt, werden in der vorliegenden Arbeit einerseits prospektive Maßnahmen zur Reduktion der Nassmischzeit aufgezeigt und andererseits versucht, mittels Mischtests einen Mischertypen sowie einen Mischablauf zu finden, der stahlfaserverstärkte UHPC-Rezepturen innerhalb einer möglichst kurzen Zeit und mit konstanter Qualität erzeugen kann.

Abstract

Ultra High Performance Concretes possess a noticeably denser and almost capillary free structure compared to Normal Concrete. The homogeneous cement stone matrix, which is poor in structural breakdowns, ensures high concrete strength (compressive strength $> 150 \text{ N/mm}^2$, bending tensile strength $> 15 \text{ N/mm}^2$) as well as an extraordinary durability and therefore opens an extensive range of applications for UHPC. The particular characteristics of this construction material allow for instance the execution of leaner and widely stretched support structures, thus increasing the architectural effect on the one hand and decreasing the amount of construction material on the other hand (concrete and reinforcement). Due to their high density, components made of UHPC further possess an extraordinarily high durability compared to Normal Concrete and therefore cause lower maintenance costs for mechanically or chemically highly loaded components or constructions, like for example landing and take-off strips at airports, clarification tanks of wastewater treatment plants or offshore constructions.

The outstanding hardened concrete properties of UHPC are significantly depending on concrete technology optimization of the mix design (determination of a granular mixture with greatest possible packing density), the quality of the post treatment of fresh concrete, as well as the mixing process and mixing technology, respectively.

Due to its special composition (high amount of fine parts, low water binder ratio, addition of steel fibre etc.), Ultra High Performance Concrete requires a considerably more energy and time intense mixing process compared to Normal Concrete in order to distribute the fine concrete constituents in the mixing container and hence homogenize the mixing material. However, currently common mixing plants often don't possess the necessary mixing efficiency or the required power, so that the production of UHPC is either not realizable at all or only with very long mixing times.

As the mixing time for big projects with UHPC crucially affects the production process and thus also the construction time and construction cost, this underlying thesis will point out prospective measures to reduce the wet mix time on the one hand and by means of tests will try to find a type of mixer and mixing procedure, which can create steel fibre reinforced UHPC-recipes within the shortest possible time and in a constant quality, on the other hand.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel.....	2
1.3	Methodik.....	2
2	Ultrahochleistungsbeton – Stand der Technik	3
2.1	Betonausgangsstoffe.....	4
2.1.1	Zement	4
2.1.2	Zuschläge	7
2.1.3	Zusatzstoffe.....	7
2.1.4	Fließmittel	8
2.1.5	Anmachwasser	12
2.1.6	Stahlfasern	12
2.2	Derzeitige Anwendungsgebiete von UHPC	13
3	Mischtechnik – Stand der Technik	15
3.1	Mischen von Feststoffpartikel.....	17
3.1.1	Dispersives Mischen	17
3.1.2	Konvektives Mischen.....	18
3.1.3	Beispiele für konvektives und dispersives Mischen.....	18
3.1.4	Mischbarkeit und Agglomeratbildung von feuchten Feststoffmischungen	19
3.2	Suspendieren von Feststoffen	24
3.2.1	Suspendierzustände und Suspensionskriterien.....	25
3.2.2	Strömungszustände	26
3.2.3	Einfluss der Viskosität	28
3.3	Einfluss des Mischwerkzeugs auf die Mischqualität	31
4	Mischen von UHPC – Stand der Technik	34
4.1	Bauarten von Betonmischern.....	35
4.2	Anforderungen an die Mischtechnik zur Herstellung von Ultrahochleistungsbeton.....	38
4.2.1	Mischphasen von UHPC	39
4.2.2	Charakterisierung der Mischgüte	42
4.3	Maschinentechnische und betontechnologische Einflüsse auf die Mischzeit von UHPC	45
4.3.1	Stabilisationszeit.....	46
4.3.2	Einfluss der Werkzeuggeschwindigkeit auf die Mischzeit.....	48
4.3.3	Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Mischzeit.....	49
4.3.4	Einfluss des Fließmittels auf die Mischzeit	51
4.3.5	Auswirkung einer zu langen Mischzeit	51
4.4	Prognosemodell zur Bestimmung der Stabilisationszeit.....	52
4.5	Einfluss des Mischregimes auf die Mischzeit und die Mischqualität ...	53
5	Durchführung von Mischversuchen	57
5.1	Motivation und Ziel der Mischversuche.....	57
5.2	Mischzeiteinsparung durch die Erzeugung von Premixes	58
5.3	Untersuchte Mischertypen	60
5.3.1	Skako Rotoconix	60
5.3.2	Kniele Konusmischer.....	64
5.3.3	MAT Gegenstrom-Intensivmischer-GIM 50	66

5.3.4	Eirich-Intensivmischer	69
5.4	Beurteilung der Mischqualität bzw. der Mischwirkung	71
5.4.1	Frischbetonprüfungen	71
5.4.2	Prüfung der Festbetoneigenschaften	73
5.5	Mischversuche Skako Rotoconix – Teil 1	74
5.5.1	Trockenes Einmischen von Stahlfasern und “Grobkorn“	76
5.5.2	Nassmischen der SCC-Rezeptur – Teil 1	78
5.5.3	Nassmischen einer F 45-Rezeptur – Teil 1	87
5.6	Mischversuche Skako Rotoconix – Teil 2	87
5.6.1	Probenentnahme der „Grobkorn-Premix“	88
5.6.2	Nassmischen der F 45-Rezeptur – Teil 2	88
5.6.3	Nassmischen der SCC-Rezeptur – Teil 2	97
5.6.4	Bindemittelsuspension	103
5.7	Mischversuche Kniele KKM Konusmischer	104
5.7.1	Nassmischen der SCC-Rezeptur	104
5.7.2	Nassmischen der F45-Rezeptur	108
5.8	Mischversuche MAT-Gegenstrom-Intensivmischer	108
5.8.1	Bindemittelsuspension	110
5.8.2	Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur_M1	110
5.8.3	Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur_M2	112
5.8.4	Festbetonprüfungen SCC-Rezeptur_M1	112
5.8.5	Festbetonprüfungen SCC-Rezeptur_M2	113
5.9	Zweistufiger Mischprozess durch die Kombination unterschiedlicher Mischer	114
5.9.1	Nassmischen der SCC-Rezeptur	115
5.9.2	Nassmischen der F-45-Rezeptur	118
5.10	Mischen der Bindemittelsuspension	121
5.10.1	Bindemittelsuspension – MAT-Gegenstrom-Intensivmischer	121
5.10.2	Bindemittelsuspension – Eirich RV01-Labormischer	123
5.10.3	Bindemittelsuspension – Ultra Turrax T50	124
5.10.4	Ergebnisse der Suspensionstests	125
5.11	Versuche zur Dosiergeschwindigkeit beim MAT-Gegenstrom- Intensivmischer	132
5.11.1	Dosierversuche: Quarzmehl (max. Partikelgröße: 40 µm)	132
5.11.2	Dosierversuche: Quarzsand (max. Partikelgröße: 200 µm)	133
5.11.3	Abschätzung der Zugabezeit verschiedener Partikelkörnungen	133
6	Schlussfolgerungen aus den Mischversuchen	135
7	Vorschläge zur Optimierung der Mischtechnik	138
7.1	Optimierung des Mischwerkzeugs	138
7.2	Gestaltung eines optimalen Mischablaufs für die Herstellung von UHPC	139
7.2.1	1.Prozessabschnitt – Erzeugung der Bindemittelsuspension	140
7.2.2	2.Prozessabschnitt – Einmischen der Grobkornfraktion	141
7.2.3	Prognosemodell zur Anwendung des optimierten Mischablauf für die Herstellung von 500 Liter UHPC	142
8	Zusammenfassung	146
9	Literaturverzeichnis	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Hochfahrwege des QUICKNET (links) und Standardquerschnitt des Fahrweges (rechts).....	1
Abbildung 2	Druckfestigkeiten unterschiedlicher Betonsorten in Abhängigkeit des W/B – Wertes (links) und qualitativer Vergleich von σ - ϵ Beziehungen unter Druck mit steigender Festigkeit (rechts).....	4
Abbildung 3	Druckfestigkeiten der einzelnen Klinkermineralien (nach Bogue und Lerch).....	6
Abbildung 4	Schematische Darstellung der Zementhydratation von Normalbeton (oben) und Hochleistungsbeton (unten)	6
Abbildung 5	Füllereffekt von Mikrosilika und Nanosilika	8
Abbildung 6	Schematische Darstellung von Suspensionsstrukturen.....	9
Abbildung 7	Schematische Darstellung der Bindemittelsuspensionsstruktur ohne (links) und mit Fließmittel (rechts).....	10
Abbildung 8	Struktur eines PCE – Moleküls	11
Abbildung 9	Sterische Abstoßung im Detail	11
Abbildung 10	Gesamtwassermenge in Anlehnung an.....	12
Abbildung 11	Wildbrücke mit Polygonbogen aus UHPC (links) und Radwegbrücke mit einer Fahrbahnplatte aus UHPC (rechts).....	14
Abbildung 12	Schematische Darstellung von Homogenität, Heterogenität und Inhomogenität (von links nach rechts).....	15
Abbildung 13	Mischgutzustände.....	16
Abbildung 14	Mischen durch Dispersion	18
Abbildung 15	Mischen durch Konvektion.....	18
Abbildung 16	vertikaler Bandmischer	19
Abbildung 17	Bindemechanismen zwischen Stoffen mit und ohne Materialbrücke in gasförmiger Umgebung	20
Abbildung 18	Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei kugelförmigen Partikeln.....	21
Abbildung 19	Agglomeratbildung.....	22
Abbildung 20	Anwachsen der Agglomerate durch Lufteinschlüsse.....	22
Abbildung 21	Haftkräfte in Agglomeraten abhängig von ihrer Sättigung mit Flüssigkeit.....	23
Abbildung 22	Schematische Darstellung der Wachstumsphasen von Agglomeraten	23
Abbildung 23	Auftretende Suspendierzustände	25
Abbildung 24	Laminares Geschwindigkeitsfeld	27
Abbildung 25	Turbulentes Geschwindigkeitsfeld.....	27
Abbildung 26	Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit im Spalt des Zwei-Platten-Modells für Scherversuche	28
Abbildung 27	Ebene, laminare (schichtenförmige) Strömung einer Flüssigkeit	29
Abbildung 28	Qualitativer Verlauf bedeutender Viskositäts- (links) und Fließfunktionen (rechts) für unterschiedliches rheologisches Stoffverhalten.....	30
Abbildung 29	Einfluss von Wasser und hinzugefügtem Fließmittel auf die Fließparameter von Beton	31

Abbildung 30	Einsatzgebiete unterschiedlicher Mischwerkzeuge	32
Abbildung 31	Primärströmung bei axial, radial und tangential wirkenden Mischwerkzeugen	33
Abbildung 32	Schnitt durch einen Planetenmischer (links) und durch einen Doppelwellen-Mischer (rechts)	35
Abbildung 33	Konfigurationsarten von Betonmischer	36
Abbildung 34	Schematische Darstellung eines Durchlaufmischers	38
Abbildung 35	Entwicklung und Schwankungen der Leistungsaufnahme eines Labor-Doppelwellen-Mischer während der Herstellung eines Feinkorn-UHPC	41
Abbildung 36	Stadien des Mischprozesses von Feinkorn UHPC in einem Labor-Doppelwellen-Mischer	42
Abbildung 37	Zusammenhang zwischen der Mischleistung P und des Setzfließmaßes d_{sj} für selbstverdichtenden Beton	45
Abbildung 38	Normierte Darstellung der Leistungsaufnahme (P/P_{max}) des Mischwerkzeugs und Berechnung der Stabilisationszeit t_s	47
Abbildung 39	Einflussgrößen auf die Mischzeit von UHPC	48
Abbildung 40	Einfluss der Werkzeuggeschwindigkeit auf die Stabilisationszeit	48
Abbildung 41	Veränderung der Mischleistungskurven in Abhängigkeit des Wasser-Mehlkornvolumen-Verhältnis (links) sowie Reduktion der Stabilisationszeit in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen der aktuellen und der maximalen Feststoffkonzentration (rechts)	49
Abbildung 42	Einfluss unterschiedlicher PCE-Fließmittelarten auf die Stabilisationszeit	51
Abbildung 43	Entstehung von neuen Reaktionsflächen aufgrund des Abriebs der ersten Hydratphasen	52
Abbildung 44	Zugabereihenfolge und Leistungsaufnahme für einen unterbrochenen Mischablauf	55
Abbildung 45	Konzept der Trockenmischanlage	59
Abbildung 46	Mischwerkzeuge des Skako Rotoconix	61
Abbildung 47	Skako Rotoconix (links) bzw. Schnitt durch den Mischer (rechts)	62
Abbildung 48	Strömungsverlauf im Skako Rotoconix	63
Abbildung 49	Varianten des Hochgeschwindigkeitswirblers beim Skako Rotoconix (links Variante A: Standardwirbel - rechts Variante B: Spezialwirbler)	63
Abbildung 50	Kniele Konusmischer [81] (links) und Blick in den Mischertrog (rechts)	64
Abbildung 51	Inneres Rührwerkzeug des KKM-Konusmischer	65
Abbildung 52	Strömungsverläufe im Kniele-Konusmischer	66
Abbildung 53	MAT Gegenstrom-Intensivmischer-GIM 50 (links oben) und eine Detailaufnahme des Mischwerks (rechts oben) - Längsschnitt (links unten) und Querschnitt (rechts unten) durch die Intensivmischzone	67
Abbildung 54	Mischprinzip des MAT – Gegenstrom – Intensivmischers	68
Abbildung 55	Mischprinzip des Eirich Intensivmischers	69
Abbildung 56	Sternwirbler (links) und Stiftenwirbler (rechts)	70
Abbildung 57	Strömungsbild eines Eirich Intensivmischers	70
Abbildung 58	Datenblatt Skako Rotoconix	75

Abbildung 59	Versuchsbedingungen im Produktionswerk der Firma Skako	76
Abbildung 60	Einmischen der Stahlfasern in die F 45-Rezeptur (links) und fertige Trockenmischung der Grobkorn-Premix für die F 45-Rezeptur (rechts).....	77
Abbildung 61	Igelbildung in der „Grobkorn-Premix“	77
Abbildung 62	Gegenüberstellung: getrockneter vs. frisch aus dem Sack entnommener Diabas	78
Abbildung 63	Einfüllen des „Bindemittel-Feinkorn-Big-Bags“ (links) und Rückstau und Verlust der Premix beim Einfüllen (rechts)	79
Abbildung 64	Fließmittelzugabe per Hand.....	79
Abbildung 65	Monitor zur Bestimmung der Leistungsaufnahme des Wirblers (links), der Schnecke (Mitte) und des Mischtrogs (rechts).....	80
Abbildung 66	Mischprozessstadien	82
Abbildung 67	Durchführungsbedingungen der Frischbetonprüfungen	83
Abbildung 68	Frischbetonprüfungen.....	84
Abbildung 69	Versuchsanordnung und Risswachstum des Prüfkörpers	85
Abbildung 70	Ermittlung des E-Moduls mittels Wegaufnehmer (links) und zerstörter Prüfkörper infolge der Druckfestigkeitsprüfung (rechts)	86
Abbildung 71	Trennung der Stahlfasern mittels Magneten.....	88
Abbildung 72	Verlauf der Leistungsaufnahme der Mischwerkzeuge bei der Herstellung der Bindemittelsuspension	90
Abbildung 73	Mischprozessstadien bei der Herstellung der Bindemittelsuspension.....	91
Abbildung 74	Leistungsaufnahme beim Einmischen der "Grobkorn-Premix"	92
Abbildung 75	Mischprozessstadien beim Einmischen der „Grobkorn-Premix“	93
Abbildung 76	Leistungsaufnahme bis zum Erreichen der Stabilisationszeit.....	94
Abbildung 77	Mischprozessstadien bei der Herstellung der Bindemittelsuspension.....	98
Abbildung 78	Mischprozessstadien beim Einmischen der „Grobkorn-Premix“	100
Abbildung 79	Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur	101
Abbildung 80	Visuelle Beurteilung der Suspension	103
Abbildung 81	Kniele KKM Konusmischer der Firma Wilhelm+Mayer Bau GmbH ...	104
Abbildung 82	Blick in den „Stahlfaser-Grobkorn-Big-Bag“	105
Abbildung 83	Mischprozess der SCC- Rezeptur am KKM-Konusmischer	107
Abbildung 84	Kontrolle der "Frischbetoneigenschaften".....	108
Abbildung 85	Beschickung des Mixers mit den Feststoffpartikeln	109
Abbildung 86	Visuelle Beurteilung der Bindemittelsuspension.....	110
Abbildung 87	Entleerung	111
Abbildung 88	Ungleichmäßige Faserverteilung und erhöhte Igelbildung	111
Abbildung 89	Herstellen der Bindemittelsuspension-Blick in den Mischertrog (links) und Entleerung der Bindemittelsuspension (rechts)	115
Abbildung 90	Beschickung des Eirich-Intensivmischers mit der Bindemittelsuspension (links) und mit den Grobkornzuschlägen (rechts).....	116

Abbildung 91	Optische Beurteilung der Bindemittelsuspension	122
Abbildung 92	Kugelharfe kurz vor dem Eintauchen in die Bindemittelsuspension..	123
Abbildung 93	Eirich-Labormischer (links) und das verwendete Mischwerkzeug (rechts).....	123
Abbildung 94	Partikelzusammenschluss (links) und nicht eingemischtes Material (rechts).....	124
Abbildung 95	Ultra Turrax T50 (links) und Mischwerkzeug (rechts)	124
Abbildung 96	Gegenüberstellung des Standardwirblers des Skako Rotoconix- Mischers (links) und einer adaptierten Version des Wirblers (rechts)	139
Abbildung 97	Schematische Darstellung eines optimalen Mischablaufs für die UHPC Erzeugung	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Hauptklinkerphasen im Portlandzementklinker.....	4
Tabelle 2	Bezeichnungen der Mischaufgaben bei unterschiedlichem Aggregatzustand.....	15
Tabelle 3	Partikeleigenschaften der Betonausgangsstoffe	60
Tabelle 4	Ergebnisse der Frischbetonprüfungen für die SCC-Rezeptur	83
Tabelle 5	Fasergehalt in der Trockenmischproben	88
Tabelle 6	Ergebnisse der Frischbetonprüfungen für die F 45 Rezeptur.....	95
Tabelle 7	Verlauf der Werkzeuggeschwindigkeiten bei der Herstellung der Bindemittelsuspension.....	97
Tabelle 8	Verlauf der Werkzeuggeschwindigkeiten beim Einmischen des „Grobkorn-Premix“	99
Tabelle 9	Ergebnisse der Frischbetonprüfungen.....	100
Tabelle 10	Ergebnisse der Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur M_1	110
Tabelle 11	Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der SCC-Rezeptur M_2.....	112
Tabelle 12	Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der SCC-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess.....	117
Tabelle 13	Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der F 45-Rezeptur	119
Tabelle 14	Fließgrenze der Bindemittelsuspension für die SCC-Rezeptur	125
Tabelle 15	Fließgrenze der Bindemittelsuspension für die F-45-Rezeptur	125
Tabelle 16	Zugabemenge und Zugabeintervalle	132

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1	Biegezugfestigkeit SCC-Rezeptur - Teil 1	85
Diagramm 2	E-Modul der Zylinderproben für die SCC-Rezeptur	86
Diagramm 3	Druckfestigkeit der Zylinderproben für die SCC-Rezeptur.....	87
Diagramm 4	Biegezugfestigkeit F 45-Rezeptur - Teil 2.....	95
Diagramm 5	E-Modul der Zylinderproben für die F 45-Rezeptur	96
Diagramm 6	Druckfestigkeit der Zylinderproben für die F 45-Rezeptur	96
Diagramm 7	Biegezugfestigkeit SCC-Rezeptur - Teil 2	101
Diagramm 8	E-Modul der Zylinderproben	102
Diagramm 9	Druckfestigkeit der Zylinderproben	103
Diagramm 10	E-Modul der Zylinderproben der SCC-Rezeptur_M1	113
Diagramm 11	Druckfestigkeit der Zylinderproben der SCC-Rezeptur_M1	113
Diagramm 12	E-Modul der Zylinderproben SCC-Rezeptur_M2.....	114
Diagramm 13	Druckfestigkeit der Zylinderproben SCC-Rezeptur_M2.....	114
Diagramm 14	Biegezugfestigkeit SCC-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess	117
Diagramm 15	E-Modul der Zylinderproben der SCC-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess.....	118
Diagramm 16	Druckfestigkeit der Zylinderproben der SCC-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess.....	118
Diagramm 17	Biegezugfestigkeit F 45-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess	120
Diagramm 18	E-Modul der Zylinderproben der F 45-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess.....	120
Diagramm 19	Druckfestigkeit der Zylinderproben der F 45-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess.....	121
Diagramm 20	Suspensionsdruckfestigkeit (SCC) – MAT.....	126
Diagramm 21	Suspensionsbiegezugfestigkeit (SCC) – MAT.....	126
Diagramm 22	Suspensionsdruckfestigkeit (F 45) – MAT	127
Diagramm 23	Suspensionsbiegezugfestigkeit (F 45) – MAT	127
Diagramm 24	Suspensionsdruckfestigkeit (SCC) – Eirich	128
Diagramm 25	Suspensionsbiegezugfestigkeit (SCC) – Eirich	128
Diagramm 26	Suspensionsdruckfestigkeit (F 45) – Eirich.....	129
Diagramm 27	Suspensionsbiegezugfestigkeit (F 45) – Eirich.....	129
Diagramm 28	Suspensionsdruckfestigkeit (SCC) – Ultra Turrax T50	130
Diagramm 29	Suspensionsbiegezugfestigkeit (SCC) – Ultra Turrax T50	130
Diagramm 30	Suspensionsdruckfestigkeit (F 45) – Ultra Turrax T50	131
Diagramm 31	Suspensionsbiegezugfestigkeit (F 45) – Ultra Turrax T50.....	131
Diagramm 32	Dosiergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Partikelgröße für den MAT-Gegenstrom-Intensivmischer	134

1 Motivation und Ziel der Arbeit

Der energie- und zeitintensive Mischvorgang von Ultrahochleistungs- beton (UHPC) erfordert vor allem bei Großprojekten, bei denen eine kontinuierliche Fertigung von UHPC-Tragelementen erfolgen soll, besonderer Beachtung. Hierbei ist es entscheidend den Mischprozess so zu gestalten, dass UHPC einerseits in konstanter Qualität und andererseits innerhalb einer möglichst kurzen Mischzeit in großer Menge erzeugt werden kann.

Die Motivation zur Untersuchung des Mischprozesses für die vorliegende Arbeit lieferte hierbei das Verkehrskonzept "QUICKWAY" der Technischen Universität Graz.

1.1 Motivation

Der fortwährende Anstieg der Weltbevölkerung wird in Zukunft dazu führen, dass sich insbesondere in Ballungsräumen die ohnehin schon überlastete Verkehrssituation zunehmend verschlechtern wird. Um diesen Zustand entgegenzuwirken, sind daher neue Verkehrskonzepte notwendig.

Ein solch neues Verkehrskonzept stellt beispielsweise das Projekt "QUICKWAY", welches mittels Hochfahrwegen aus Ultrahochleistungs- beton die Ausbildung einer zweiten Verkehrsebene über bereits bestehenden Straßen ermöglicht und damit zu einer Entlastung des herkömmlichen Straßenverkehrs führt dar. Durch die Entwicklung eines kompletten QUICKWAY – Netzes (QUICKNET) auf dem sowohl der öffentliche als auch der Individualverkehr geführt werden kann, ist ein Ansatz zur Lösung des städtischen Mobilitätsproblem gegeben [1].

Ein Modellentwurf des QUICKNET sowie der Standardquerschnitt des Fahrweges sind in Abbildung 1 dargestellt.

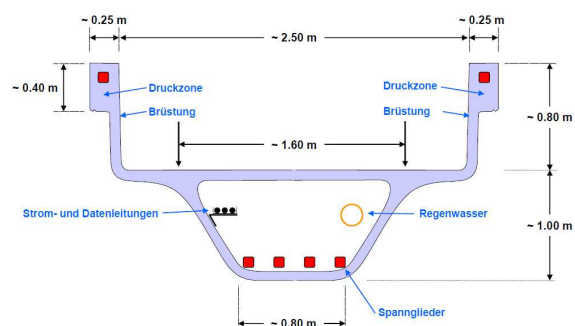
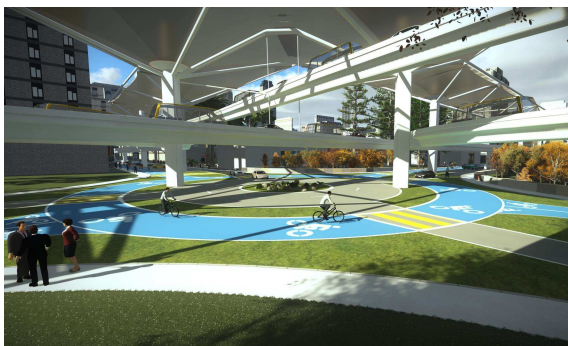


Abbildung 1 Hochfahrwege des QUICKNET (links) und Standardquerschnitt des Fahrweges (rechts) [2]

Die Bauweise des QUICKNET beruht auf einem Baukastensystem bei dem die einzelnen Bauteilsegmente stationär vorgefertigt und anschließend vor Ort auf der Baustelle mittels Spanngliedern miteinander verbunden werden.

Für einen effizienten und flüssigen Verkehrsstrom gehen die Entwickler des QUICKWAY – Projekts davon aus, dass pro Einwohner einer Großstadt, ein Laufmeter Fahrweg erforderlich ist. Umgerechnet auf eine Stadt mit einer Million Einwohnern hätte das QUICKNET somit eine Gesamtlänge von einer Million Metern bzw. tausend Kilometern. Um die geforderte Tagesleistung bei der Herstellung eines solchen Netzes einzuhalten, sind demzufolge hohe Anforderungen an den Baubetrieb und an die Logistik zu stellen [3].

Bei der Herstellung der UHPC-Fertigteilstegmente sind daher insbesondere die Betonmischer gefordert, die für die tägliche Produktion notwendige Betonmenge konstant und möglichst zeitsparend zu erzeugen. Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Thematik der optimierten UHPC – Erzeugung.

1.2 Ziel

Ziel der Arbeit ist das Finden eines geeigneten Mischertyps und die Festlegung eines Mischablaufs, womit stahlfaserbewehrte UHPC-Rezepturen für zukünftige Großprojekte möglichst zeitsparend und in hoher Qualität (Frisch- und Festbetoneigenschaften) erzeugt werden kann.

1.3 Methodik

Hierzu erfolgt in einem theoretischen Teil der Arbeit eine Analyse der wichtigsten Parameter, die Einfluss auf die Mischzeit und auf das Mischergebnis (Frisch- und Festbetoneigenschaften) von UHPC haben. Diese sind beispielsweise die Art des Mischwerkzeugs, die Werkzeuggeschwindigkeit, die Betonzusammensetzung, die Zugabereihenfolge der Betonausgangsstoffe etc. Im experimentellen Teil der Arbeit werden anhand zweier unterschiedlicher Rezepturen, Mischersysteme von verschiedenen Herstellern auf deren Eignung zur Erzeugung von UHPC getestet. Die Beurteilung der Versuchsergebnisse erfolgt in Form von Frisch- und Festbetonprüfungen sowie einer statistischen Untersuchung der Faserverteilung im Trockenmischgut.

Anhand der analytischen Betrachtung der Einflussgrößen auf die Mischzeit und die Mischqualität sowie den Erkenntnissen aus den Mischversuchen, werden in weiterer Folge Anpassungsvorschläge bzw. Adaptierungsmaßnahmen für die Betonmischer dargestellt, um eine Betonerzeugung zeitsparend und in konstanter Qualität zu ermöglichen.

2 Ultrahochleistungsbeton – Stand der Technik

Ultrahochleistungsbetone (UHPC) verfügen im Vergleich zu Normalbetonen über ein deutlich dichteres und nahezu kapillarporenfrees Betongefüge. Die weitaus homogenere und an Gefügestörungen arme Zementsteinmatrix von UHPC führt bei Belastungen zu gleichmäßigen Beanspruchungen im Beton und ermöglicht daher Druckfestigkeiten von über 150 N/mm^2 [4].

Die hohen Druckfestigkeiten und die besondere Gefügedichtigkeit von UHPC resultieren vor allem aus einer optimierten Zusammensetzung der Kornmatrix (größtmögliche Packungsdichte) und dem niedrigen Wasser-Bindemittelwert ($W/B \approx 0,2$) [4].

Um die maximale Packungsdichte zu erreichen, sind die Korngrößen so aufeinander abzustimmen, dass Hohlräume zwischen größeren Zuschlagsstoffen durch immer feinere Partikelkörnungen aufgefüllt werden. Die maximale Packungsdichte ist somit durch die Korngrößenverteilung und die Kornform bestimmt [4].

Der geringe Wassergehalt im UHPC führt einerseits dazu, dass die Zementpartikel im Kornhaufwerk nur oberflächlich hydratisieren, und die nicht hydratisierten Kerne als feste Partikel im Betongefüge als Füller wirken [5]. Andererseits hat ein W/B -Wert $\leq 0,4$ zur Folge, dass kein Überschusswasser (welches weder chemisch in die Hydratationsprodukte eingebaut noch physikalisch gebunden ist) in der Betonmatrix vorliegt und so die Bildung von Kapillarporen, die ausschlaggebend für die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton sind, vermindert wird [6].

Die durch den herabgesetzten Wassergehalt herbeigeführte erschwerte Verarbeitbarkeit des Frischbetons ist dabei durch die Zugabe von Fließmitteln auszugleichen.

UHPC hat im Vergleich zum Normalbeton, der sich unter Belastung durch innere Gefügeveränderungen (quasi) – duktil verhält, ein ausgesprochen sprödes bzw. schlagartiges Versagensverhalten. Durch die Zugabe von Stahlfasern kann die Duktilität jedoch gesteigert und sogar eine Zugfestigkeit von über 15 N/mm^2 erreicht werden [4].

In Abbildung 2 sind die Druckfestigkeiten unterschiedlicher Betonsorten in Abhängigkeit des W/B -Wertes sowie die Arbeitslinien verschiedener Betone unter Druckbeanspruchung dargestellt.

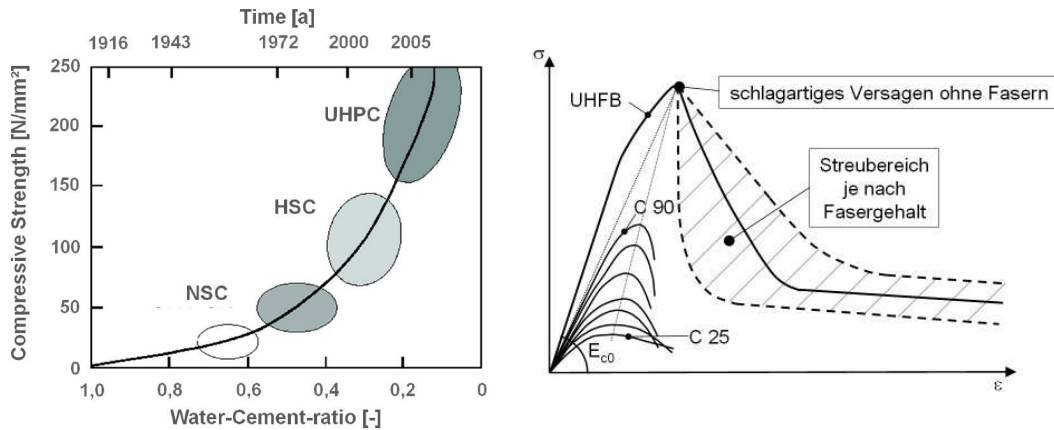


Abbildung 2 Druckfestigkeiten unterschiedlicher Betonsorten in Abhängigkeit des W/B – Wertes [7] (links) und qualitativer Vergleich von σ - ϵ Beziehungen unter Druck mit steigender Festigkeit [8] (rechts)

2.1 Betonausgangsstoffe

Die in Kapitel 2 beschriebenen Eigenschaften von UHPC resultieren vor allem im Übergang vom Drei- zum Fünf- bzw. Sechs- Stoff – Komponentensystem. Während Normalbeton aus den Stoffen Zement, Zuschlag und Wasser gemischt wird, sind beim UHPC zur Erlangung seiner besonderen Eigenschaften darüber hinaus hochreaktive Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel und gegebenenfalls Stahlfasern zuzugeben [9].

Die einzelnen Ausgangsstoffe und ihre Wirkung werden nachfolgend beschrieben:

2.1.1 Zement

Zement ist ein aus Kalkstein, Ton und Mergel gebranntes hydraulisches Bindemittel das durch die Reaktion mit dem Anmachwasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärtet [10]. Der Brennprozess der Ausgangsstoffe führt zur Bildung von Zementklinker. Dieser kann in vier Klinkerphasen mit unterschiedlichem Beitrag zum Erhärtungsverlauf unterteilt werden [11].

Lfd.Nr.	Mineral	Kurzform	Formel	Gehalt [%]
[A]	[B]	[C]	[D]	[E]
1	Tricalciumsilicat	C ₃ S	3 CaO • SiO ₂	40-80
2	Dicalciumsilicat	C ₂ S	2 CaO • SiO ₂	2-30
3	Tricalciumaluminat	C ₃ A	3 CaO • Al ₂ O ₂	3-15
4	Calciumaluminatferrit	C ₂ (A,F)	4 CaO • Al ₂ O ₂ • Fe ₂ O ₃	4-15

Tabelle 1 Hauptklinkerphasen im Portlandzementklinker [11]

Die in Tabelle 1 dargestellten Klinkerphasen unterscheiden sich einerseits in der Reaktionsgeschwindigkeit und andererseits in der Mitwirkung zur Festigkeitsentwicklung des Zementsteins. Während das C₃A und das

C_3S rasch nach der Wasserzugabe hydratisieren, reagieren das $C_2(A,F)$ und das C_2S deutlich langsamer [12].

Der gesamte Hydratationsverlauf kann in mehrere Hydratationsstadien gegliedert werden. Im ersten Stadium setzt unmittelbar nach der Wasserzugabe eine kurze aber intensive Hydratation der Zementpartikel ein. Hierbei bilden sich aufgrund der Reaktion des Tricalciumaluminats (C_3A) mit dem Anmachwasser auf den Oberflächen der Klinkerpartikel feine säulenförmige Ettringitkristalle. Daneben führt das Tricalciumsilicat (C_3S) zur Entstehung von ersten Calciumsilicathydraten (CSH) in kolloidaler Form. Nach der Bildung einer dünnen Lage von Hydratationsprodukten verebbt die erste Hydratationsperiode, da das Anmachwasser nicht durch die dünne Lage der ersten CSH-Phasen zu den Zementpartikeln gelangt. Es stellt sich daher bis zum Erstarrungsbeginn des Zementleims eine Ruheperiode, in der keine weitere Hydratation stattfindet ein [12].

Da die ersten Hydratationsprodukte noch zu klein sind um den Porenraum zwischen den Zementpartikeln zu überbrücken kann sich noch kein festes Gefüge ausbilden. Die Zementpartikel bleiben daher nach wie vor gegeneinander beweglich, sodass der Zementleim bzw. der Beton zwar etwas steifer wird, jedoch weiterhin verarbeitbar bleibt [12].

Der Erstarrungsbeginn des Zementleims bzw. des Betons setzt etwa ein bis drei Stunden nach der Wasserzugabe ein. Im nachfolgenden Stadium (etwa vier Stunden nach der Wasserzugabe) erfolgt die Beschleunigungsperiode in der erneut eine intensive Hydratation der Klinkerphasen eintritt. Hierbei kommt es zur Bildung von langfaserigen CSH-Faserbüscheln bzw. CSH-Blattstrukturen die sich aus den Calciumsilicaten (C_3S) und (C_2S) unter Abspaltung von Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) entwickeln [13].

Die damit verbundene Vergrößerung der Kristalle führt dazu dass die Zwischenräume der Zementpartikel nun überbrückt werden und in weiterer Folge eine fortschreitende Verfestigung des Gefüges (Erhärten) eintritt. Mit Fortdauer des Hydratationsverlaufes kommt es zu einer immer stärker werdenden Verdichtung und Verfestigung des Gefüges. Das Ende der Beschleunigungsperiode tritt nach etwa 24 Stunden ein [12].

Die Frühfestigkeiten des Zements werden vorwiegend von der Hydratation des C_3S bestimmt. Da die Hydratation des C_2S im Vergleich zum C_3S langsamer abläuft, findet der Beitrag zur Festigkeitsentwicklung verzögert und somit erst im höheren Zementsteinalter (siehe Abbildung 3) statt. Nach 28 Tagen sind in der Regel 90 % der Hydratation abgeschlossen [12].

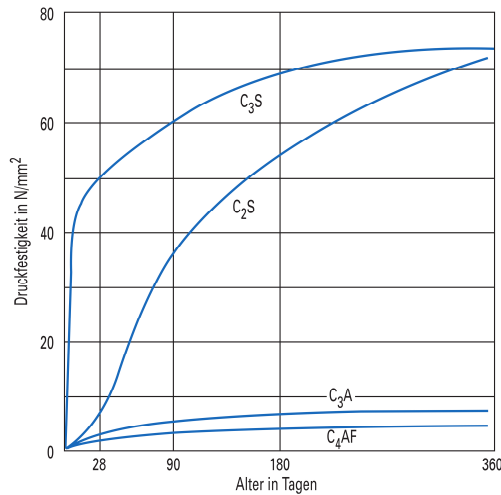


Abbildung 3 Druckfestigkeiten der einzelnen Klinkerminerale (nach Bogue und Lerch) [12]

Für die Herstellung von Hochleistungsbetonen sollten nach SAFRANEK Zemente mit einem möglichst geringen C₃A und C₂(A,F) Gehalt verwendet werden, da diese in den Kontaktzonen zwischen den Zementpartikel und den Zuschlägen durch die Reaktion mit Sulfaten zur erhöhten Bildung von Ettringit führen. Die Ettringitbildung führt hierbei zu einer Vergrößerung des Volumens der Ausgangsstoffe (Sulfatreiben) wodurch es aufgrund der großen mechanischen Spannungen zu Ablätzungen bzw. zu einer Schwächung des Zementsteins in der Grenzfläche zur Gesteinskörnung und somit zu einem Festigkeitsverlust kommt (siehe Abbildung 4) [11].

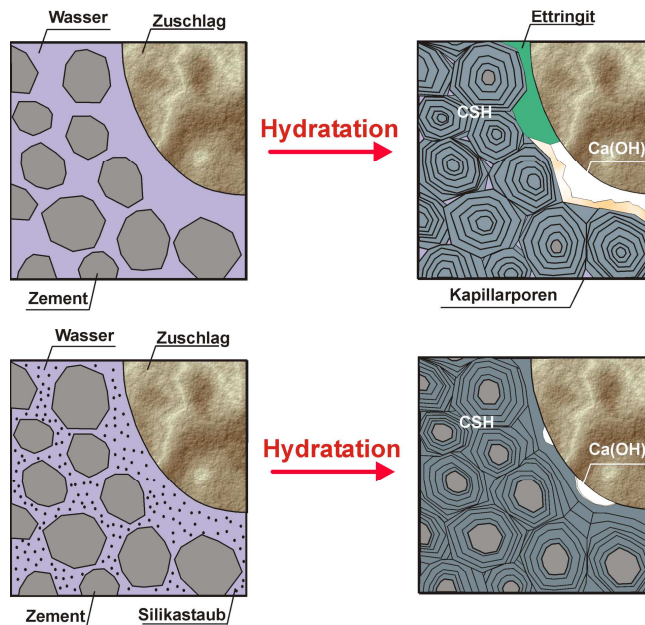


Abbildung 4 Schematische Darstellung der Zementhydratation von Normalbeton (oben) und Hochleistungsbeton (unten) [11]

2.1.2 Zuschläge

Da UHPC gezielt auf die jeweilige Anwendung und somit in unterschiedlichen Varianten hergestellt werden kann, können für UHPC sowohl Zuschläge mit einer Korngröße von bis zu 16 mm (Grobkorn – UHPC) als auch Zuschläge mit einer Korngröße kleiner 1 mm verwendet werden [14].

Um die hohen Festigkeiten von UHPC zu erreichen, ist neben den hohen Zementsteinfestigkeiten auch auf eine entsprechend hohe Festigkeit der Zuschläge zu achten. Aufgrund ihrer hohen Druckfestigkeit von bis zu 300 N/mm² bzw. 400 N/mm² eignen sich als Zuschläge von UHPC insbesondere Quarzsand und Quarzmehl bzw. Basaltsplit und Diabas [11].

2.1.3 Zusatzstoffe

Als Zusatzstoffe gelten sehr feinkörnige Stoffe die dem Beton zur Erlangung von bestimmten Frisch- und Festbetoneigenschaften zugegeben werden [15].

Die ÖNORM B 4710–1 unterscheidet hierbei zwischen zwei Arten von Zusatzstoffen:

- Typ I: nahezu inaktive Zusatzstoffe (Gesteinsmehle, Pigmente etc.)
- Typ II: puzzolanische oder latentlydraulische Zusatzstoffe (Flugasche, Silikastaub etc.) [15]

Zusatzstoffe vom Typ I dienen aufgrund ihrer Korngröße, Kornzusammensetzung und Kornform dazu, den Hohlraumgehalt im Mehlkornbereich ($d < 0,125$ mm) zu reduzieren und somit die Packungsdichte des Korngemisches zu erhöhen. Bei optimaler Korngrößenabstufung verringert die Zwickel-Füllwirkung der Zusatzstoffe trotz der Erhöhung der gesamten spezifischen Kornoberfläche den Wasseranspruch des Gemisches. Zusatzstoffe vom Typ II verfügen neben dem Füllereffekt zusätzlich über eine festigkeitssteigernde Wirkung [16], [17], [18]. Sie dürfen daher bei der Betonzusammensetzung aufgrund ihres Beitrags zur Festigkeitsentwicklung mittels k -Wert dem W/B -Wert und dem Zementgehalt angerechnet werden [15]:

$$\frac{W}{B} = \frac{\text{Wasser}}{\text{Zement} + k \times \text{Zusatzstoff}}$$

Des Weiteren verbessern Zusatzstoffe das Wasserrückhaltevermögen des Bindemittelleims und wirken somit der Ausbildung eines Wasserfilms auf den Zuschlägen entgegen. Dadurch wird ein lokal erhöhter W/B -Wert und eine damit verbundene Erhöhung der Porosität in der Grenzfläche zwischen Bindemittel und Zuschlag vermieden [16].

Aufgrund ihrer geringen Teilchengröße von 0,10 - 0,30 μm und ihrer puzzolanischen Wirkung eignen sich insbesondere Mikrosilika als Zusatzstoff für UHPC. Mikrosilika stellen ein Abfallprodukt (Filterstaub) der

Aluminium- und Siliciumerzeugung dar und besitzen im Vergleich zu Zement eine 100-fach geringere mittlere Teilchengröße.

Die hohe Feinheit der Mikrosilika führt dazu, dass die Packungsdichte durch das Ausfüllen der Zwickel der größeren Zementpartikel erhöht und die Dichtigkeit der Zementsteinmatrix wesentlich vergrößert wird (siehe Abbildung 5). Darüber hinaus wird durch die Zugabe von Mikrosilika auch die Wasserdurchlässigkeit vermindert und der Widerstand gegen chemische Angriffe sowie die Frost- bzw. Frosttausalzbeständigkeit erhöht [11].

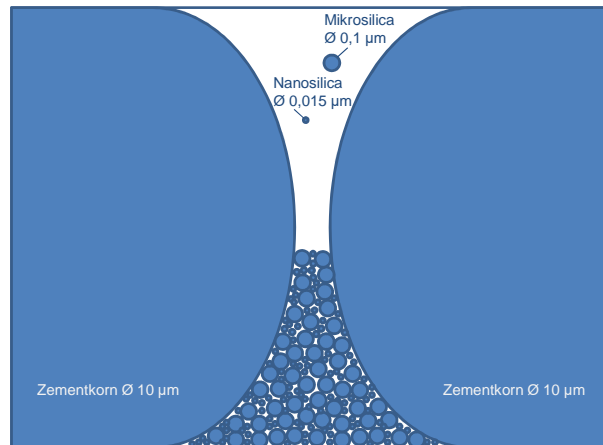
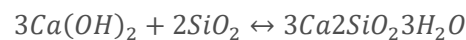


Abbildung 5 Füllereffekt von Mikrosilika und Nanosilika (in Anlehnung an [19])

Die puzzolanische und somit festigkeitssteigernde Wirkung der Mikrosilika beruht auf der Reaktion des SiO_2 mit dem bei der Hydratation des Zements entstandenem Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Das gebildete Calciumsilikathydrat (CSH) führt in weiterer Folge zum Anstieg der Betonfestigkeit [11].



2.1.4 Fließmittel

Für die Herstellung von UHPC erfordert der hohe Anteil an Feinststoffen und der geringe Wasserbindemittelwert ($\text{W/B} \approx 0,2$) den Einsatz von hochwirksamen Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatethern [16].

Die Verarbeitbarkeit des UHPC ist direkt von der Suspensionstruktur des Frischbetons abhängig. Bis zum Übergang zur Suspension liegt während des Mischprozesses ein teilbefeuchtetes Kornhaufwerk vor, dessen Verformungsverhalten von den herrschenden Kapillarkräften bestimmt wird [13].

Bindemittel- und Betonsuspensionen vereinen sowohl Festkörper- als auch Flüssigkeitseigenschaften. Bis zu einer bestimmten Grenzschubspannung τ_0 (entspricht der Fließgrenze) verhält sich die Suspension wie ein Festkörper. Mit dem Überschreiten der Grenzschubspannung entspricht das rheologische Verhalten der Suspension, dem einer Flüssig-

keit [5]. Die Fließgrenze wird hierbei von interpartikulären Kräften zwischen den Feinstoffen bestimmt [13].

Die in einer Flüssigkeit verteilten Feststoffpartikel sind aufgrund von verschiedenen Oberflächenladungen ständig Anziehungs- und Abstoßungskräften ausgesetzt und können sich daher nicht frei untereinander bewegen. Diese interpartikulären Wechselwirkungen zwischen den Partikeln in einer Suspension bestimmen durch ihre Ladungsverteilung ob eine dispergierte, agglomerierte oder flockulierte Suspensionsstruktur vorliegt. Dominieren die abstoßenden Kräfte liegt eine dispergierte bis teilagglomerierte Suspension vor. Überwiegen die anziehenden Kräfte liegt eine agglomerierte bis flockulierte Suspension vor.

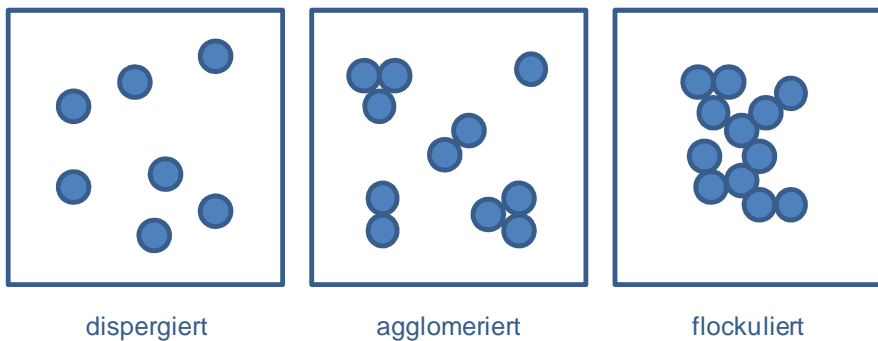


Abbildung 6 Schematische Darstellung von Suspensionsstrukturen (in Anlehnung an [13])

Aufgrund der kristallinen Struktur der Klinkerpartikel und der ersten Hydratationsprodukte der Aluminate bilden sich bedingt durch die unterschiedlichen Oberflächenladungen van-der-Waal'sche Anziehungskräfte, die zu einer flockulierten Struktur der Bindemittel- bzw. Betonsuspension führen. Das Flockulieren der Feststoffpartikel führt dazu dass, ein Teil des Anmachwassers in den Zwickeln eingeschlossen wird und somit rheologisch unwirksam wird [13].

Durch die Zugabe von Fließmitteln lagern sich die enthaltenen polymeren Moleküle an den Oberflächen der Zementpartikel an (Fließmitteladsorption). Infolge der elektrostatischen und der sterischen Abstoßwirkung des Fließmittels kommt es zum Dispergieren der Agglomerate wodurch das eingeschlossene Wasser für die Verflüssigung zur Verfügung steht und die Fließfähigkeit der Suspension gesteigert wird [13].

2.1.4.1 Elektrostatische Abstoßung

Der elektrostatische Abstoßungseffekt beruht darauf, dass sich die mit einer dichten negativen Ladung belegten organischen Hauptketten des Fließmittels, an die positiv geladenen Oberflächen der Bindemittelteilchen anhaften. Somit werden Bindemittelpartikel mit gleicher Ladung erzeugt, die sich in weiterer Folge gegenseitig abstoßen [13].

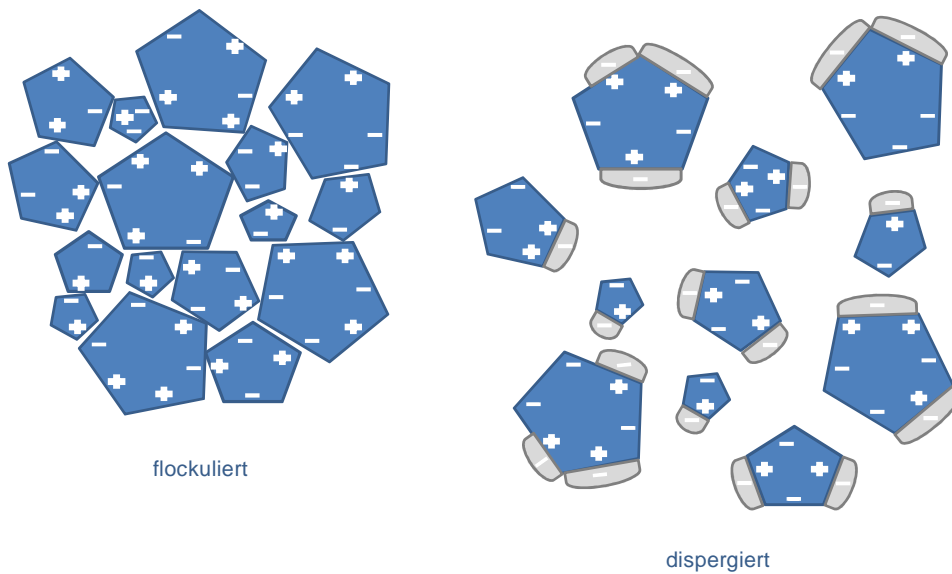


Abbildung 7 Schematische Darstellung der Bindemittelsuspensionsstruktur ohne (links) und mit Fließmittel (rechts) (in Anlehnung an [13])

Die Wirksamkeit von Fließmitteln wird von der Adsorptionsneigung des Fließmittels mit dem Zementklinker bestimmt. Je stärker die Adsorptionsneigung desto schneller und effizienter tritt der Abstoßungseffekt des Fließmittels ein. Bei einer geringen Adsorptionsneigung tritt der Dispergierereffekt später ein. Eine starke Adsorptionsneigung findet bei Fließmitteln statt deren Hauptkette eine hohe anionischen Ladungsdichte besitzt. Dabei gilt umso höher die Ladungsdichte, desto mehr Fließmittelmoleküle werden von den Bindemittelpartikeln adsorbiert und desto stärker wird die Fließgrenze reduziert [20].

Aufgrund der fortschreitenden Hydratation und den ständig neu entstehenden Oberflächen der Hydrationsprodukte werden die Fließmittelmoleküle jedoch mit der Zeit überwachsen. Die dadurch hervorgerufene Verringerung der Fließmittelmoleküle führt mit fortschreitender Zeit zu einer Abnahme der Dispergierwirkung und somit zur Verringerung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Fließmittel mit hoher Ladungsdichte verfügen demzufolge über eine hohe Anfangsverflüssigung jedoch nur über einen kurzen Konsistenzerhalt. [13].

Fließmittelpolymere mit geringerer Ladungsdichte verfügen über eine geringere Adsorptionsneigung und somit auch über ein reduziertes Potential zur Absenkung der Fließgrenze. Mit Fortdauer des Hydratationsprozesses können die anfangs noch nicht adsorbierten Fließmittelmoleküle jedoch von den neu gebildeten Oberflächen der Hydratationsprodukten adsorbiert werden (Depot-Effekt), sodass der Dispergierereffekt des Fließmittels im Vergleich zu Fließmitteln mit hoher Ladungsdichte länger wirksam ist. Fließmittel mit geringer Ladungsdichte verfügen demzufolge über eine geringere Anfangsverflüssigung, jedoch aber über einen längeren Konsistenzerhalt [20].

2.1.4.2 Sterische Abstoßung

Fließmittelmoleküle auf Basis von Polycarboxylatethern bestehen aus einer Hauptkette und einer Vielzahl von Seitenketten die je nach gewünschter Wirksamkeit modifiziert werden können (Längenverhältnis zwischen Haupt- und Seitenkette, unterschiedliche Ladungsdichte etc.) [13].

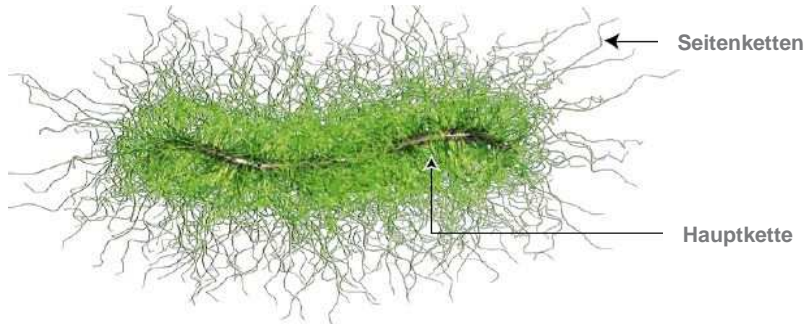


Abbildung 8 Struktur eines PCE – Moleküls [21]

Die Seitenketten, die in den Molekülen in großer Anzahl vorhanden sind, bewirken die sterische (räumliche) Abstoßung der Suspensionspartikel. Dies geschieht durch die dichte Verästelung der Molekülseitenketten, die eine Annäherung der Partikel gegeneinander unterbinden und somit abstoßend wirken.

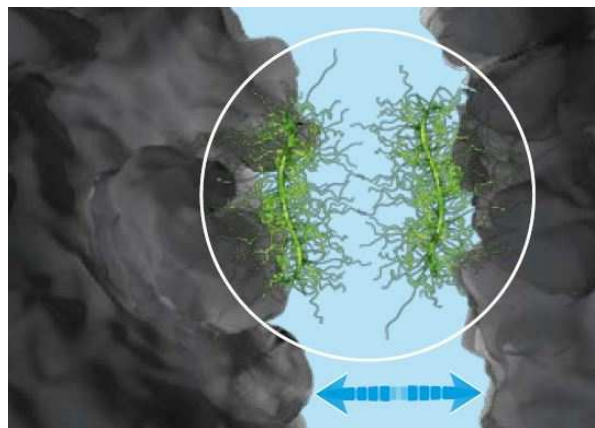


Abbildung 9 Sterische Abstoßung im Detail [21]

Durch mögliche Variationen der Länge und Anzahl von Haupt- und Seitenketten ergeben sich Polymere mit besonderen Eigenschaften [21].

- Polymere mit sehr hoher Wasserreduktion, hoher Anfangsverflüssigung und geringer Verarbeitungszeit
- Polymere mit hoher Wasserreduktion und verlängerter Verarbeitungszeit
- Polymere mit langer Verarbeitungszeit

2.1.5 Anmachwasser

Soweit keine erhärtungsstörende oder sonstige ungünstige Bestandteile enthalten sind, ist als Anmachwasser jedes in der Natur vorkommende Wasser geeignet [11].

Wasser, welches beim Auswaschen von Beton- oder Mörtelresten (Restwasser) bzw. jedes sonstige Wasser welches zum Reinigen von Mischertrommeln, Fahrmaschinen oder Betonpumpen anfällt, darf für die Herstellung von Ultrahochleistungsbeton nicht verwendet werden [11].

Die Gesamtwassermenge im Beton ergibt sich nach Abbildung 10 aus der Eigenfeuchte der Zuschlagsstoffe, den Wasseranteilen aus den Zusatzstoffen und Zusatzmitteln und dem Zugabewasser [11].

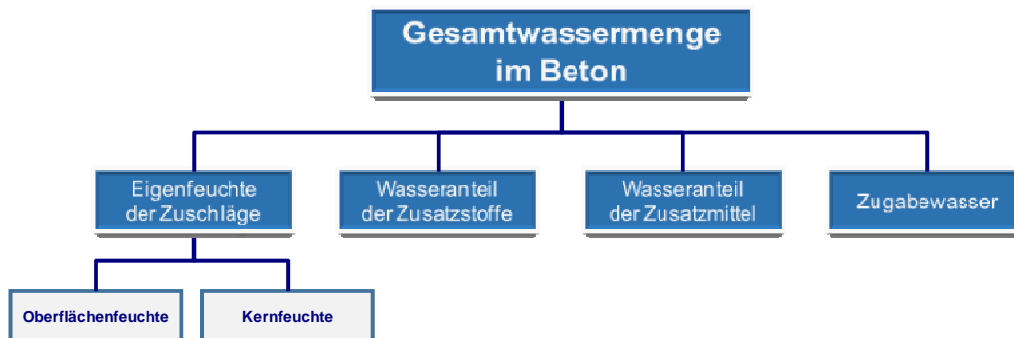


Abbildung 10 Gesamtwassermenge in Anlehnung an [11]

Bei der Mischungsberechnung (Stoffraumrechnung) ist für die Einhaltung eines bestimmten W/B-Wertes der Eigenfeuchteanteil der Zuschläge bzw. der Wasseranteil der Zusatzstoffe und Zusatzmittel zu ermitteln und vom Anteil des Zugabewassers abzuziehen.

2.1.6 Stahlfasern

Da sich UHPC ohne Fasern nahezu linear – elastisch verhält und ein sprödes und schlagartiges Versagen besitzt, sind dem Beton zur Erhöhung seiner Duktilität Stahlfasern in ausreichender Menge beizugeben [16].

Durch die besonders fest in die UHPC – Matrix eingebundenen Stahlfasern können hohe Verbundspannungen übertragen werden und somit das Anwachsen von Rissen behindert werden [4]. Die Anzahl der Risse nimmt hierbei zwar zu, der Ausbildung von durchlaufenden Trennrissen wird durch die Stahlfasern jedoch entgegengewirkt [16].

Die Abmessungen der Fasern richten sich primär nach dem jeweiligen Verwendungszweck. Grundsätzlich werden die meisten ultrahochfesten Betone mit einem Faserdurchmesser von 0,15 - 0,20 mm und einer Faserlänge von 6 - 13 mm hergestellt [16].

Für die Wirksamkeit der Fasern in der UHPC – Matrix ist „die Fasergeometrie [...] so zu wählen, dass die Reißfestigkeit der Faser größer ist als die Verbundfestigkeit [...]“ [22]

Für eine optimale Ausnutzung der Fasern darf die Kraft ab der ein sprödes Faserversagen (F_{ft}) eintritt nur geringfügig größer sein als die Ausziehungskraft (F_{fb}) [22].

$$F_{ft} = f_{ft} \times \frac{d_f^2 \times \pi}{4}$$

F_{ft} Bruchkraft

f_{ft} Zugfestigkeit der Faser

d_f Faserdurchmesser

$$F_{fb} = \tau_f \times d_f \times \pi \times \frac{l_f}{2}$$

F_{fb} Ausziehungskraft

τ_f Schubverbundfestigkeit zwischen Faser und Matrix

d_f Faserdurchmesser

l_f Faserlänge

Durch Gleichsetzen und Umformen der obigen Gleichungen kann die maximal erlaubte Faserschlankheit ($\frac{l_f}{d_f}$) ermittelt werden.

$$\frac{l_f}{d_f} \leq \frac{f_{ft}}{2 \times \tau_f}$$

Bei einer zu groß gewählten Faserschlankheit erhöht sich die Tendenz zu Faseransammlungen bzw. zu Verklumpungen (Igelbildung) während des Mischprozesses. Aus diesem Grund sollte die Faserschlankheit nach der folgenden Gleichung begrenzt werden [22]:

$$\frac{l_f}{d_f} \leq \frac{220}{\rho_f}$$

ρ_f Fasergehalt [Vol.-%]

Für eine ausreichende Einbindung der Fasern ist bei deren Auswahl darüber hinaus das verwendete Größtkorn zu berücksichtigen [22]. Nach WALRAVEN sollte das Verhältnis zwischen Faserlänge und Durchmesser des Größtkorns einen Wert zwischen 2 und 3 aufweisen [23].

2.2 Derzeitige Anwendungsgebiete von UHPC

Ultrahochfeste Betone eignen sich aufgrund ihrer hohen Festigkeit und außerordentlichen Dauerhaftigkeit vor allem für Bauteile, „[...] die einer hohen lastinduzierten oder korrosiven Beanspruchung ausgesetzt sind“ [16].

Im Hochbau ermöglichen die hohen Betongüten die Ausführung von höheren Gebäuden, größeren Spannweiten und schlankeren Tragwerken. So führen beispielsweise schlankere Stützen neben dem zusätzlichen Raumgewinn auch zu einer Verminderung des Eigengewichts und zur Einsparung von Baustoffen (Beton und Bewehrung) [16].

Des Weiteren erhöht sich mit der Herstellung filigraner Bauteile auch die architektonische Wirkung des Tragwerks.

Angesichts der schlanken Konstruktionsmöglichkeiten lassen sich mit UHPC insbesondere weitgespannte Brückentragwerke mit geringen Querschnittsabmessungen realisieren (siehe Abbildung 11) [16].



Abbildung 11 Wildbrücke mit Polygonbogen aus UHPC [24] (links) und Radwegbrücke mit einer Fahrbahnplatte aus UHPC [25] (rechts)

Die hohe Dichtigkeit von Ultrahochleistungsbeton führt dazu, dass Bauwerke aus UHPC im Vergleich zu Normalbeton über eine deutlich höhere Lebensdauer verfügen und somit geringere Unterhaltskosten verursachen [4]. Daher sind vor allem frostgefährdete Außenbauteile, verschleißbeanspruchte Verkehrsflächen (Start- und Landebahnen von Flugplätzen) und Bauteile die in Kontakt mit stark korrosionsfördernden Medien stehen (Offshorebauwerke, Kläranlagen etc.), besonders für die Anwendung von UHPC geeignet [16].

Die hohe Widerstandsfähigkeit dieses Baustoffes ermöglicht zudem die Verwendung von UHPC im Sicherheitsbereich. Beispiele hierfür sind Schutzwände oder Sicherheitsfassaden die vor Explosionen, Schuss- oder Anprallbelastungen schützen sollen [26].

Ein weiteres Anwendungsgebiet für UHPC stellt der Maschinenbau dar. Hier wird UHPC für die Herstellung von Maschinenbetten oder auch für Maschinenbauteile verwendet [27].

Für die Fertigung von hoch belasteten Einzelbauteilen wie Konsolen oder Ankerplatten findet UHPC ebenso Verwendung [16].

3 Mischtechnik – Stand der Technik

Das Mischen verschiedener Stoffe stellt eine Grundoperation der Verfahrenstechnik dar und wird in vielen unterschiedlichen Industriesparten benötigt. Unabhängig ob in der Lebensmittel-, Kosmetik-, Chemie- oder Baustoffindustrie ist das Ziel des Mischprozess in allen Sparten ident. Nämlich das Erreichen einer geforderten Mischqualität innerhalb einer möglichst kurzen Mischzeit.

Unter dem Begriff Mischen versteht man das zufällige Verteilen von Masseteilchen in einem vorgegebenen Volumen (Mischbehälter), wobei sich die Teilchen in wenigstens einer Eigenschaft (z.B. Partikelgröße, Partikelform, Aggregatzustand, Dichte etc.) unterscheiden. Der Mischprozess wird dabei wesentlich vom Aggregatzustand und der Stoffpaarung beeinflusst [28].

Disperse Phase \ Kontinuierliche Phase		Disperse Phase		
		Gas	Flüssigkeit	Feststoffpartikeln
Gas		Homogenisieren	Zerstäuben	Verwirbeln
Flüssigkeit	löslich	Begasen	Homogenisieren	Suspendieren, Dispergieren, Aufwirbeln
	nicht löslich		Emulgieren	
Feststoffpartikel		Fluidisieren	Befeuchten, Coaten	Feststoffmischen

Tabelle 2 Bezeichnungen der Mischaufgaben bei unterschiedlichem Aggregatzustand (in Anlehnung an [28])

Die verschiedenen Mischvorgänge können hierzu entsprechend nach Tabelle 2 unterteilt werden, wobei die Mischvorgänge nach dem überwiegenden (kontinuierliche Phase) und dem darin verteilten Aggregatzustand (disperse Phase) unterschieden werden [5].

Das Ziel des Mischprozesses ist die gleichmäßige Verteilung (Homogenisierung) sämtlicher Mischgutbestandteile im Mischungsvolumen und eine damit verbundene Erhöhung der Produktqualität [28]. Als Homogenität wird hierbei die Gleichheit einer physikalischen Eigenschaft über die gesamte Ausdehnung eines Systems bzw. der Konzentrationsausgleich von Elementen innerhalb eines Systems bezeichnet [29].

In Abbildung 12 wird der Begriff Homogenität schematisch dargestellt:



Abbildung 12 Schematische Darstellung von Homogenität, Heterogenität und Inhomogenität (von links nach rechts) [29]

Die erzielbare Homogenität eines Gemisches ist hierbei von folgenden Einflussgrößen abhängig [28], [30]:

- Maschineneinflussgrößen
 - Mischgefäßvolumen und Mischgefäßform, Motorleistung Werkzeuggeometrie, Gestaltung und Wirkungsweise der Mischorgane etc.
- Betriebseinflussgrößen
 - Füllungsgrad, Werkzeuggeschwindigkeit, Mischzeit etc.
- Produkteinflussgrößen
 - Viskosität, Teilchengröße, Teilchenanzahl, Haftkräfte zwischen den Teilchen etc.
- Umgebungseinflussgrößen
 - Druck, Temperatur, etc.

In Abbildung 13 sind dazu mögliche Mischungszustände dargestellt:

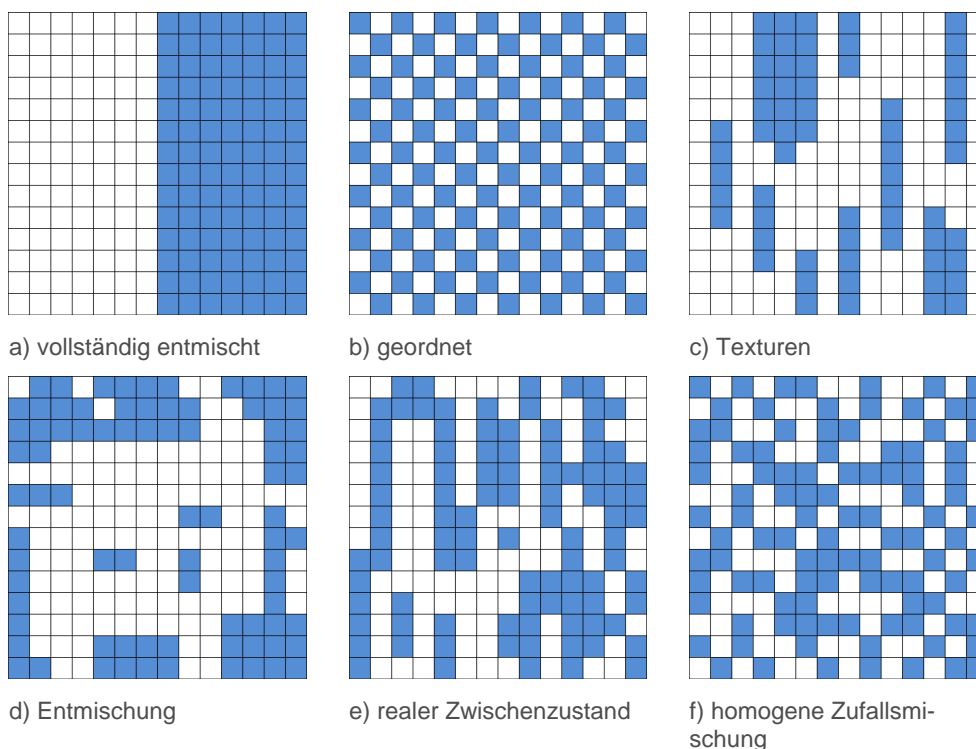


Abbildung 13 Mischungszustände (in Anlehnung an [28])

Hierbei zeigt der Bildbereich a) den vollständig entmischten Anfangszustand der beispielsweise zum Zeitpunkt der Mischerbeschickung vorliegt. Im Bildbereich b) ist der Zustand einer absoluten Homogenität dargestellt. Eine absolute Homogenität bzw. die totale Gleichheit des gesamten Stoffsystems stellt sich jedoch nur bei einer geordneten Verteilung aller Mischkomponenten ein. Da die Verteilung der Mischgutkomponenten während des Mischprozesses jedoch vollkommen zufällig abläuft, ist

das Erreichen einer absoluten Homogenität ohne dem Zutun von Nahordnungskräften nicht realisierbar [11].

Die realisierbaren Mischgutzustände werden sich zwischen den Bildbereichen c) bis f) ausbilden. Zu Beginn des Mischvorgangs werden sich einzelnen Texturen bilden die mit fortwährender Mischdauer in einen realen Zwischenzustand oder bei stark voneinander abweichenden Partikeleigenschaften (Korngröße, Kornform, Rohdichte etc.) in einen Entmischungszustand übergehen. Nach einer ausreichend langen Mischzeit geht der reale Zwischenzustand in die homogene Zufallsmischung über.

Aufgrund des im Mischer vollkommen zufälligen ablaufenden Mischprozesses der Mischgutkomponenten, stellt die homogene Zufallsmischung aus dem Bildbereich f) somit den bestmöglichen Mischungszustand dar.

Die Mischqualität der homogenen Zufallsmischung wird neben der freien Beweglichkeit der Partikel auch von den Größen-, Form- und Dichteunterschieden der Partikel beeinflusst [31].

3.1 Mischen von Feststoffpartikel

Um unterschiedliche Stoffe miteinander zu vermischen und zu homogenisieren, sind im Mischgut einerseits Relativbewegungen zwischen den einzelnen Partikeln und andererseits zwischen größeren Partikelkollektiven bzw. Partikelgruppen zu erzeugen.

Diese Relativbewegungen können einerseits durch freie bzw. erzwungene Konvektion oder durch reine Molekularbewegung (Diffusion) der Partikel erzeugt werden [5].

Der Begriff Konvektion bezeichnet die gemeinsame Bewegung relativ großer Partikelgruppen durch rotierende Mischwerkzeuge. Als Diffusion wird die individuelle, stochastische Bewegung einzelner Elemente bezeichnet [32].

Nach WEINEKKÖTTER können die Partikelbewegungen beim Mischen von Feststoffen als eine Überlagerung bzw. Kombination aus dem dispersiven und konvektiven Transport beschrieben werden.

3.1.1 Dispersives Mischen

Dispersives Mischen bezeichnet die gänzlich zufälligen Platzwechsel einzelner Partikel im Mischgut aufgrund von untereinander stattfindenden Kollisionen, welche durch die vom Mischwerkzeug erzwungenen Bewegungen ausgelöst werden. Hierbei erfolgt durch hohe Werkzeuggeschwindigkeiten und dem gezielten Einleiten von Scherkräften ein zerteilen der Partikelkollektive. Die Häufigkeit dieser Platzwechsel einer Partikelkomponente wird durch die Anzahl der sich in direkter Nachbarschaft befindlichen Partikel einer anderen Partikelkomponente bestimmt. Dispersives Mischen charakterisiert somit eine lokale Vermischung der

einzelnen Partikelkomponenten im Mischgut und führt zu einer Feinvermischung (Mikromixing) des Mischguts [32].

Die Wirkungsweise des dispersiven Mischens ist in Abbildung 14 schematisch dargestellt:

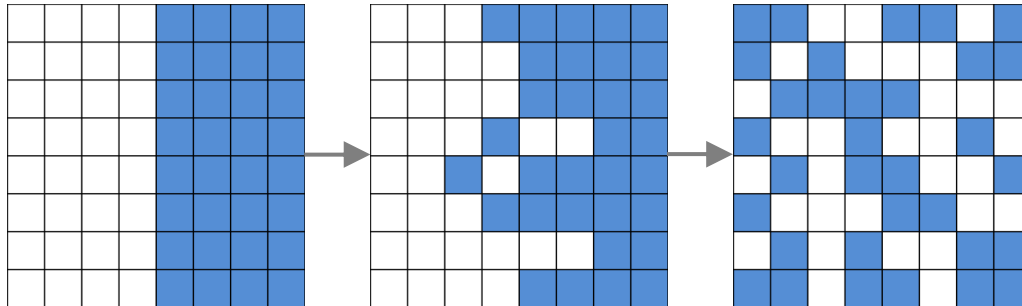


Abbildung 14 Mischen durch Dispersion (in Anlehnung an [32])

3.1.2 Konvektives Mischen

Als konvektives Mischen werden die Relativbewegungen größerer Partikelgruppen zueinander bezeichnet (Makromixing). Hierbei erfolgt eine schonende Verteilung des Mischguts mit geringer Werkzeuggeschwindigkeit und einem minimalen Eintrag von Scherkräften. Beim konvektiven Mischen wird das gesamte Mischgut durch die Einwirkung des Mischwerkzeugs fortlaufend geteilt und nach einem Platzwechsel wieder vermengt. Konvektives Mischen führt hiermit zu einer Erhöhung der Anzahl andersartiger Partikelkomponenten in der direkten Nachbarschaft einzelner Mischgutpartikel und fördert infolgedessen die dispersiven Mischvorgänge im Mischgut [32].

Die Wirkungsweise des konvektiven Mischens ist in Abbildung 15 schematisch dargestellt:

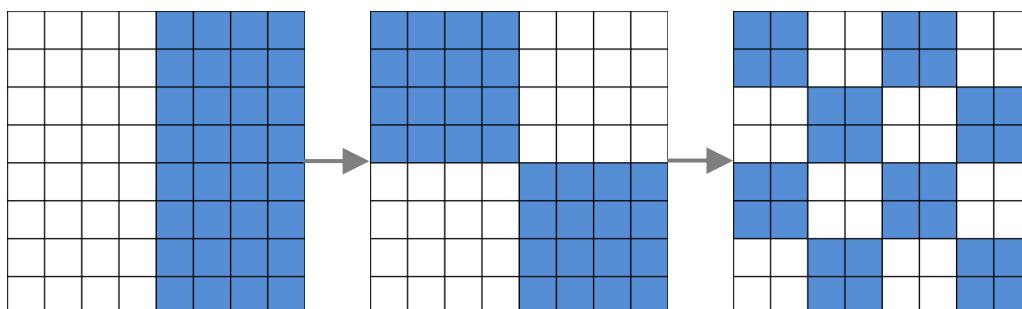


Abbildung 15 Mischen durch Konvektion (in Anlehnung an [32])

3.1.3 Beispiele für konvektives und dispersives Mischen

Beispiele für rein konvektiv arbeitende Mischsysteme sind Schnecken- oder Bandmischer die in der Lebensmittel- Kunststoff- oder Pharmaindustrie für die schonende Mischung von freifließenden Pulvern oder zur

Granulierung verwendet werden. Das Mischgut wird hierbei durch eine Bandschnecke ständig geteilt und wieder zusammengefügt. Bei einer vertikalen Anordnung der Bandschnecke (siehe Abbildung 16) wird das Mischgut entlang der Behälterwand nach oben gefördert, wo es anschließend unter der Einwirkung der Schwerkraft wieder zum Behälterboden sinkt und anschließend wieder nach oben gefördert wird [33].



Abbildung 16 vertikaler Bandmischer [33]

Vertreter für konvektive Mischer in der Betonproduktion sind beispielsweise Freifallmischer [32].

Während konvektive Mischer das Mischgut schonend umwälzen zeichnen sich dispersiv arbeitende Mischer durch hochtourige Mischwerkzeuge (Wirbler) aus, die das Mischgut so stark beschleunigen, dass die einzelnen Partikel durch den Mischraum geworfen und Partikelgruppen aber auch Partikelagglomerate (siehe Kapitel 3.1.4) durch die Einwirkung von hohen Scherkräften zerteilt werden.

Um eine höchstmögliche Homogenität im Mischgut innerhalb einer möglichst kurzen Mischzeit zu erreichen, muss der Mischprozess, insbesondere für schwer mischbare Partikelkonglomerate wie beispielsweise UHPC, als Überlagerung des konvektiven und des dispersiven Mischprozesses erfolgen.

3.1.4 Mischbarkeit und Agglomeratbildung von feuchten Feststoffmischungen

Die Mischbarkeit bzw. die Qualität der Mischung von Feststoffen hängt stark von den Bindemechanismen und den Haftkräften, die zwischen den Partikeln herrschen ab [31]. Die Stärke der Anziehungskräfte wird dabei direkt von der Partikelgröße und der Gewichtskraft der Partikel beeinflusst. Dabei führt eine Verringerung des Partikeldurchmessers zu einer Abnahme der Gewichtskraft in der dritten Potenz und gleichzeitig zu einer Zunahme der Haftkraft zwischen Partikel mit geringen Abständen in der ersten bis zweiten Potenz. Demnach ist die Anziehungskraft eines Partikels umso höher je kleiner der Partikel ist. So ist beispielsweise die

Anziehungskraft eines Partikels mit einem Durchmesser von 1 μm gegenüber seiner Gewichtskraft um das 10^6 -fache höher [5].

In gasförmiger Umgebung können nach SCHUBERT die Haftkräfte zwischen Partikel in Bindemechanismen mit und ohne Materialbrücke differenziert werden (siehe Abbildung 17) [5].

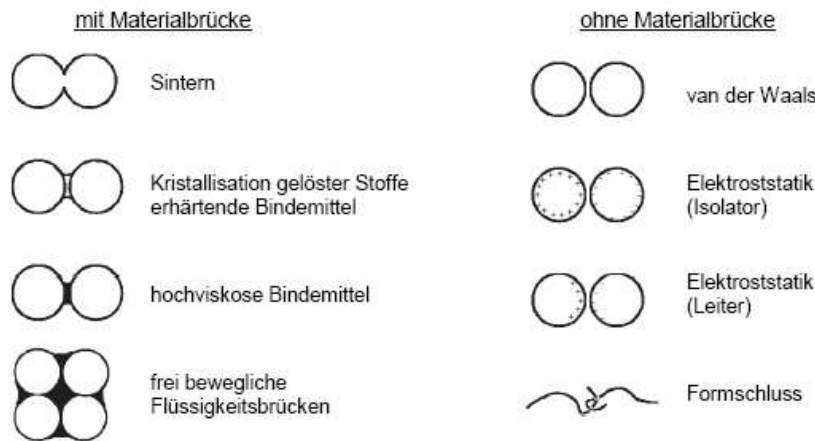


Abbildung 17 Bindemechanismen zwischen Stoffen mit und ohne Materialbrücke in gasförmiger Umgebung [34] zitiert bei [5]

In feuchten Partikelgemischen werden die Haftkräfte überwiegend von Kapillarkräften bestimmt. Mit dem Übergang zu einer Suspension entfallen die Kapillarkräfte. Die Beweglichkeit der einzelnen Partikel in Suspensionen wird durch interpartikuläre Kräfte (van der Waals Kräfte, elektrostatische Kräfte etc. beeinflusst. Im Vergleich zu den interpartikulären Haftkräften sind die Kapillarkräfte in feuchten Partikelgemischen um einen Faktor von etwa 10 größer [5].

Kapillarkräfte bestimmen die Entstehung von Agglomeraten (Partikelzusammenschlüsse) und werden hauptsächlich bei Partikeln im Größenbereich von $d < 0,1 \text{ mm}$ wirksam. Sie treten auf, wenn die einzelnen Partikeloberflächen im Mischgut nicht vollständig mit Flüssigkeit benetzt bzw. gesättigt sind. Die Flüssigkeit ist hier lediglich in den Zwickeln der Partikelberührungspunkte als Flüssigkeitsbrücke vorhanden [5]. Diese Flüssigkeitsbrücke übt in Abhängigkeit „[...] der geometrischen Anordnung und den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Feststoffs und der Flüssigkeit, anziehende Kräfte auf die Partikel [...]“ [5] aus.

Die aufgrund einer Flüssigkeitsbrücke wirkenden Anziehungskräfte zwischen zwei kugelförmigen Partikeln setzt sich nach Abbildung 18 aus dem kapillaren Druckunterschied zwischen dem Flüssigkeitsinneren und der umgebenden Flüssigkeit (kapillarer Unterdruck) sowie aus der Oberflächenspannung der Flüssigkeit zusammen. [5].

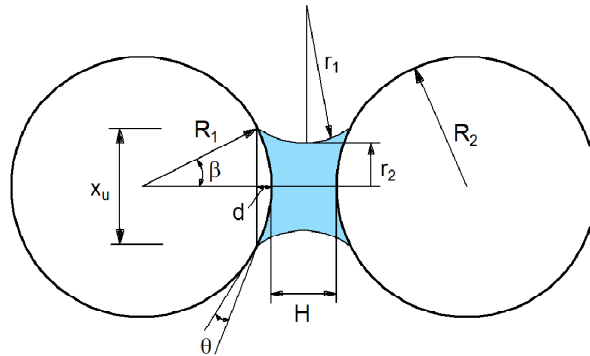


Abbildung 18 Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei kugelförmigen Partikeln [5]

Die beiden Kraftkomponenten der Kapillarkraft sind in den nachfolgenden Formeln dargestellt:

$$F_{Kap} = F_P + F_{l,v}$$

mit

$$F_P = \pi \times R^2 \times \Delta P \times \sin^2 \beta$$

$$F_{l,v} = 2\pi \times R \times \gamma_l \times \sin^2 \beta$$

F_P Kraftanteil aus dem kapillaren Unterdruck

$F_{l,v}$ Kraftanteil aus der Oberflächenspannung

R Partikelradius

ΔP Druckunterschied zwischen der Luft- und Flüssigkeitsgrenzschicht

β halber Zentriwinkel

γ_l Oberflächenspannung der Flüssigkeit

Mit steigendem Abstand H (z.B. durch den Eintrag von Mischenergie) kommt es zur Dehnung und bei Überschreitung des kritischen Abstands zum Platzen der Flüssigkeitsbrücke. Der kritische Abstand wird hierbei von der Oberflächenrauheit der Partikel bestimmt und ist für Partikel unterschiedlicher Größe aber gleichen Stoffes annähernd identisch [5].

Durch die Ausbildung von Flüssigkeitsbrücken zwischen mehreren benachbarten Feststoffpartikeln, kommt es zu Partikelansammlungen und Lufteinschlüssen bzw. zur Entstehung von Agglomeraten (siehe Abbildung 19).

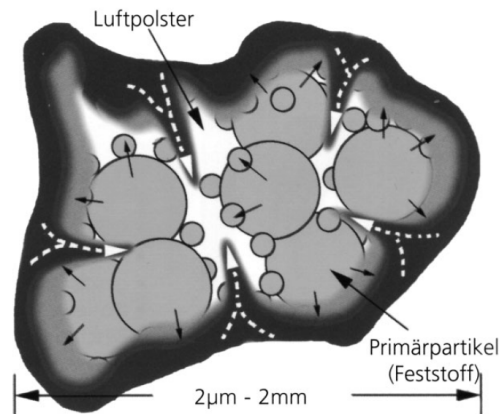


Abbildung 19 Agglomeratbildung [35]

Die durch das rotierende Mischwerkzeug aufgezwungenen Ortswechsel der Feststoffpartikel, führen in einem nicht vollständig mit Flüssigkeit gesättigtem feinem granularem Mischgut, mit Fortdauer des Mischprozesses zu einem Anwachsen der Agglomerate [36].

Der Wachstumsprozess startet dabei unmittelbar nach dem ersten Kontakt zwischen einer Flüssigkeit und den feinen Feststoffpartikeln (sofortiges Anlagern der Feinstoffe an einzelne Flüssigkeitstropfen – Phase I). Die Rotationsbewegungen im Mischgut führen in weiter Folge dazu, dass die Flüssigkeit im Mischgut fein verteilt wird und sich zwischen den Feinstoffen aufgrund der zunehmenden Sättigung der Partikel mit Flüssigkeit, Flüssigkeitsbrücken ausbilden, welche zu einem Ansteigen der Haftkräfte führen (Phase II) [37].

Durch das ständige Umschichten der feuchten Partikelgruppen und der einzelnen Partikel kommt es mit zunehmender Mischdauer zu Lufteinschlüssen zwischen den mit Flüssigkeitsbrücken verbundenen Feststoffpartikeln und somit zu einem weiteren Anwachsen der Agglomerate.

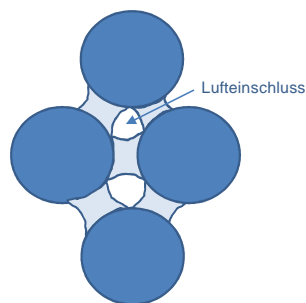


Abbildung 20 Anwachsen der Agglomerate durch Lufteinschlüsse

Mit fortschreitender Mischzeit werden die Partikel stärker verteilt und die Zwischenräume der größeren Partikeln mit feineren Partikeln ausgefüllt. Hierbei entweicht die eingeschlossene Luft aus den Partikelzwischenräumen wodurch diese mit Flüssigkeit gefüllt werden und es zu einer Verdichtung bzw. Verfestigung der Agglomerate kommt (Phase III) [36], [37].

Sind die vorhandenen Hohlräume mit Flüssigkeit gefüllt, kommt es aufgrund des starken kapillaren Unterdrucks wiederum zum Ansteigen der Haftkräfte (Phase IV) [37].

Ein weiteres Anwachsen der Agglomerate kann durch die Vereinigung mehrerer kleinerer Agglomerate entstehen (Koaleszenz). Durch die vom Mischwerkzeug erzeugten Relativbewegungen kommt es zu gegenseitigen Kollisionen der Agglomerate. Eine Koaleszenz wird dann erreicht wenn „[...] die Stoßenergie aufgrund des viskosen Widerstands der Flüssigkeitsschicht im Kontaktbereich sowie durch die Verformung der Kollisionspartner dissipiert werden kann [38].“

Die fortschreitenden Kollisionen der Agglomerate mit dem Mischwerkzeug sowie mit größeren Partikeln führen mit Fortdauer des Mischprozesses zum Abrieb und zum Bruch der Agglomerate. Ein gänzlicher Zerfall der Agglomerate und dem damit verbundenen schlagartigen Abfall der Haftkräfte entsteht durch die vollständige Sättigung der Partikel mit Flüssigkeit (Phase V) [37].

Die verschiedenen Phasen der Haftkraftsteigerung und des Agglomeratwachstums sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt.

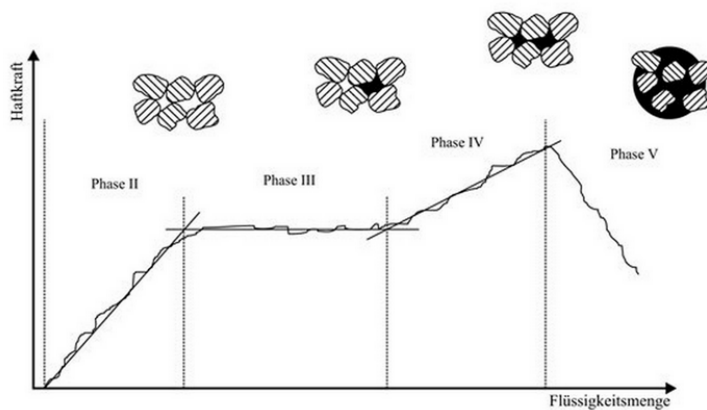


Abbildung 21 Haftkräfte in Agglomeraten abhängig von ihrer Sättigung mit Flüssigkeit [37]

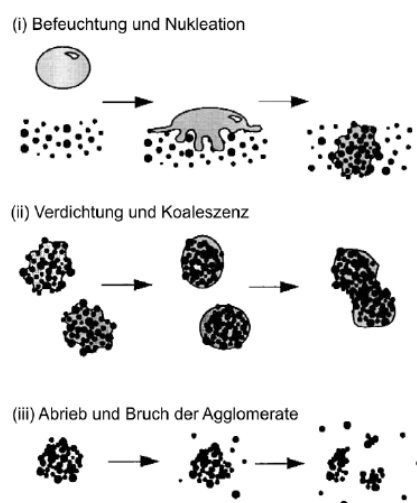


Abbildung 22 Schematische Darstellung der Wachstumsphasen von Agglomeraten [36]

Aufgrund des Anstiegs der Haftkräfte und der damit verbundenen Agglomeration wird es umso schwieriger Relativbewegungen zwischen den Partikeln zu erzeugen, je weiter das Mischgut vom Verhalten eines freifließenden Gemisches entfernt ist (Entstehung hoher Widerstandskräfte welche die Platzwechselforgänge im Mischgut erschweren) [31].

Für hohe Mischqualitäten sind die Agglomerate daher möglichst vollständig aufzulösen und die Oberflächen der einzelnen Partikel mit Flüssigkeit zu benetzen.

Zur Auflösung der Agglomerate sind während des Mischprozesses hohe Scherkräfte, die zu Kollisionen der Partikel im Mischgut und damit zum Aufbrechen der Agglomerate führen, erforderlich. Die Größe der Scherkräfte wird dabei vom Partikelabstand, der Partikelart, der Mischfrequenz der Werkzeuggeometrie und dem Energieeintrag des Mischwerkzeugs bestimmt. Da eine hohe Packungsdichte zu einer Vergrößerung der Anzahl von Agglomeratkollisionen führt, wird das Aufbrechen der Agglomerate bzw. das Dispergieren des Mischguts neben einer hohen Werkzeuggeschwindigkeit auch durch eine hohe Packungsdichte in der Mischung gefördert. Hier wirken insbesondere die größeren Partikelkörnungen als eine Art „Mikromischer“ [36].

3.2 Suspensieren von Feststoffen

Wird einem Feststoffgemisch ausreichend Flüssigkeit beigegeben entsteht daraus eine Suspension. Eine Suspension ist demnach ein Stoffgemisch aus einer Flüssigkeit und fein darin verteilten bzw. in Schwebelage gehaltenen Feststoffpartikeln. Mörtel und Beton stellen beispielsweise eine mineralische Suspension dar [39].

Der Übergang vom Feststoffgemisch in eine Suspension hat zur Folge, dass die Kapillarkräfte und die damit verbundene Agglomeration entfallen und die Fließfähigkeit des Gemisches ansteigt [5].

Die Mischqualität einer Suspension wird maßgeblich durch die Dispergierung der Feststoffe bestimmt. Der Begriff Dispergieren bezeichnet das Vermischen von mindestens zwei Stoffen, die sich nicht oder kaum ineinander lösen oder chemisch miteinander verbinden. Beim Dispergieren wird die Feststoffkomponente (disperse Phase) durch hohe Scherkräfte möglichst fein in der Flüssigkeit (Dispersionsmittel) verteilt. Idealerweise sind die einzelnen Feststoffpartikel vollständig mit dem Dispersionsmittel benetzt [40].

Für eine optimale chemische oder biologische Reaktion der Suspension ist eine größtmögliche aktive Oberfläche der Ausgangsstoffe nötig. Je feiner die Feststoffpartikel in der Suspension aufgeschlossen sind, desto größer ist die aktive Oberfläche der Partikel im Verhältnis zu ihrem Volumen. Für die Herstellung von Suspensionen spielt demnach der kolloidale Aufschluss der feinsten Partikelkomponenten (Trennung von Feinststoffagglomeraten und -klumpen sowie gleichmäßige Verteilung der Partikel in der Suspension) eine große Rolle [41].

Als Kolloid gelten mikroskopisch kleine Feststoffteilchen die in einem Medium größtmöglich verteilt sind (Entropie). In der Regel liegen diese Teilchen als einzelne Feststoffkomponenten jedoch nicht in solch feiner Form, sondern als Partikelcluster bzw. -klumpen vor und müssen erst durch hohe Scherkräfte aufgebrochen werden [41].

3.2.1 Suspendierzustände und Suspensionskriterien

Als Suspendieren wird in der Misch- bzw. Verfahrenstechnik das temporäre „[...] Aufwirbeln von zur Sedimentation neigenden Feststoffpartikeln in einer Flüssigkeit zum Zwecke besseren Phasenkontakts [...] [37]“ verstanden. Die gesamte Oberfläche der Feststoffpartikel ist somit für die Flüssigkeit nur zugänglich wenn sich die Feststoffteilchen in Schwebelage befinden.

Für eine feine Verteilung der Feststoffpartikel in der Flüssigkeit und zur Vermeidung von Sedimentationserscheinungen des Feststoffes sind hohe Werkzeuggeschwindigkeiten des Rührers und der Eintrag von turbulenten Strömungszuständen notwendig.

In Abbildung 23 sind verschiedenen Suspendierzustände schematisch dargestellt.

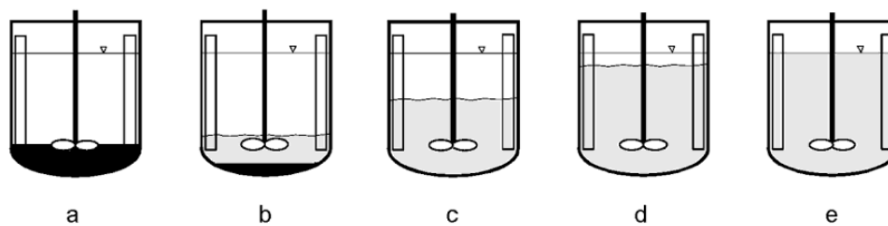


Abbildung 23 Auftretende Suspendierzustände [42]

Liegt keine ausreichende Werkzeuggeschwindigkeit vor, setzen sich sämtliche Feststoffpartikel bedingt durch die Schwerkraft am Behälterboden ab (Bildbereich a). Mit zunehmender Werkzeuggeschwindigkeit wird ein Teil der Feststoffpartikel von der umlaufenden Strömung mitgerissen, aufgewirbelt und bis zu einer gewissen Höhe suspendiert bzw. verteilt. Die restlichen Feststoffpartikel befinden sich jedoch nach wie vor am Behälterboden oder führen nur eine Rollbewegung aus (Bildbereich b). Dieser Suspendierzustand wird daher auch als unvollständige Suspension bezeichnet. Sobald die eingebrachte Werkzeuggeschwindigkeit ein länger andauerndes Absetzen der Feststoffpartikel verhindert, wird die gesamte Partikeloberfläche von der Flüssigkeit umströmt und dieser Zustand als vollständige Suspension bezeichnet (Bildbereich c). Durch eine weitere Zunahme der Werkzeuggeschwindigkeit folgt ein deutlicher Anstieg der Trennlinie zwischen der Suspensionsphase und der darüber geschichteten klaren Flüssigkeit (Bildbereich d). Noch höhere Werkzeuggeschwindigkeiten führen zu einer homogenen Suspension, in der eine vollständige Suspendierung der Feststoffpartikel im gesamten Mischbehälter vorliegt (Bildbereich e). Dieser Zustand ist hinsichtlich der Fluidodynamik nur dann erreichbar, wenn die Sinkgeschwindigkeit der Partikel gegen Null geht [42].

3.2.2 Strömungszustände

Beim Mischen bzw. Rühren von Suspension finden im Mischbehälter in Abhängigkeit der Bauart des Mischwerkzeugs und der Werkzeuggeschwindigkeit unterschiedliche Strömungszustände statt.

Die Strömungszustände in einem Mischbehälter sind mit Hilfe der Rührer-Reynolds-Zahl beschreibbar.

$$Re = \frac{\rho \times n \times D^2}{\eta}$$

Rührer-Reynolds.Zahl [-]

ρ Fluiddichte

n Werkzeugumdrehungen pro Sekunde

D Werkzeugdurchmesser

η dynamische Viskosität

Die Rührer-Reynolds-Zahl stellt eine dimensionslose Größe dar, die den Strömungszustand im Mischbehälter anhand der herrschenden Zähigkeits- und Trägheitskräfte beschreibt [37]. Die Zähigkeit bzw. Viskosität stellt dabei ein Maß für die Fließfähigkeit eines Fluids dar. Fluide mit hoher Viskosität sind dickflüssiger und weniger fließfähig als Fluide mit niedriger Viskosität und fließen daher bei gleichen Bedingungen langsamer ab [43].

Eine hohe Reynoldszahl stellt eine trägheitsbestimmte, impulsreiche Strömung (turbulentes Mischen) und eine niedrige Reynoldszahl eine zähe schleichende Strömung (laminares Mischen) dar [37].

3.2.2.1 Laminares Mischen

Im Mischbehälter liegt ein laminarer Strömungszustand vor, solange die Zähigkeitskräfte gegenüber den Trägheitskräften überwiegen und die Rührer-Reynolds-Zahl daher einen Wert $Re < 10$ aufweist [37]. In einer laminaren Strömung bewegen sich die Fluidteilchen auf unterschiedlichen parallelen Bahnen. Innerhalb einer Strömungsbahn bewegen sich die Fluidteilchen mit gleicher Geschwindigkeit. Zwischen den parallel verlaufenden Bahnen herrschen in der Regel unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten die zu Reibungseffekten bzw. zu Schubspannungen führen.

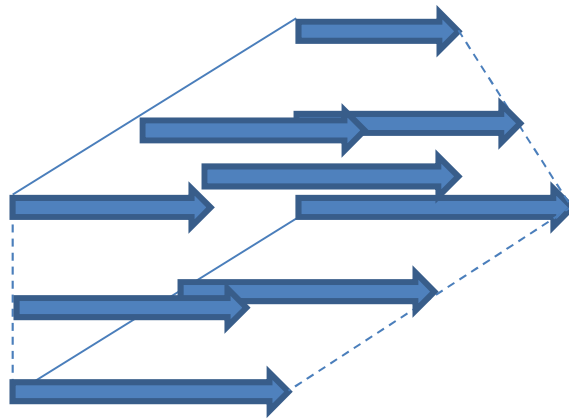


Abbildung 24 Laminares Geschwindigkeitsfeld (in Anlehnung an [37])

Die höchsten Schubspannungen herrschen an Bereichen an denen die Fluidschicht direkt an einer festen Oberfläche (Behälterwand) vorbeiströmt, da hier der Geschwindigkeitsunterschied und somit das Schergefälle am größten ist [37].

Da sich die Stromlinien im Mischbehälter beim laminaren Mischen nicht kreuzen, kommt es nur zu einer Längsvermischung in der Suspension. Die für eine vollständige Durchmischung notwendige Quervermischung kann beim laminaren Mischen daher nur durch den Einsatz von Strömungsstörern erfolgen [28].

Anwendungsbeispiele für das laminare Mischen stellen die Herstellung zähflüssiger Cremes und Pasten dar [28].

3.2.2.2 Turbulentes Mischen

Mit Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit geht der laminare in einen turbulenten Strömungszustand über.

„In einer turbulenten Strömung bewegt sich das Fluid als Kontinuum zwar in einer bestimmten Richtung, jedes einzelne Fluidteilchen vollführt aber zufällige Schwankungsbewegungen in alle Raumrichtungen. Der Hauptströmung sind an jeder Stelle räumlich und zeitlich veränderliche Zusatzströmungen überlagert [37].“

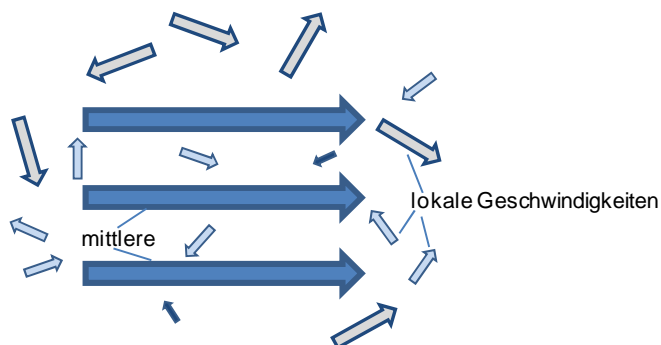


Abbildung 25 Turbulentes Geschwindigkeitsfeld (in Anlehnung an [37])

Beim turbulenten Mischen steigt die Rührer-Reynolds-Zahl auf $Re > 10^4$. Die hohe Rührer-Reynolds-Zahl hat zur Folge, dass sich im Mischgut

örtlich instationäre dreidimensionale Wirbelströmungen ausbilden, wodurch es zu einer vollständigen Längs- und Quervermischung der Suspension kommt [28].

„Die turbulente Strömung bewirkt aber nicht nur makroskopische Konvektionsbewegungen, sondern intensive Durchmischung selbst kleinster Volumenbereiche bis herunter in molekulare Dimensionen (Mikrovermischung), was insbesondere für die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen wichtig sein kann [37].“

Turbulentes Mischen ist für die Herstellung von kolloidal aufgeschlossenen Suspensionen wie beispielsweise Bentonitsuspensionen notwendig.

3.2.3 Einfluss der Viskosität

Nach der Rührer-Reynolds-Zahl hängt das im Mischbehälter erzeugte Strömungsfeld maßgeblich von der dynamischen Viskosität ab.

Die dynamische Viskosität beschreibt die Zähigkeit des Mischguts und wird durch die Feststoffkonzentration in der Suspension beeinflusst. Die Zähigkeitskräfte des Mischguts verursachen durch die zwischen den Flüssigkeitsschichten wirkende Reibung ein Abbremsen der Strömung, wodurch der Strömungsimpuls der Suspension reduziert wird [37].

Die dynamische Viskosität kann anhand des „Zwei-Platten-Modelles“ beschrieben werden. Hierbei befindet sich nach Abbildung 26 zwischen zwei plan-parallelen Platten das Volumenelement eines homogenen Körpers [36], [42].

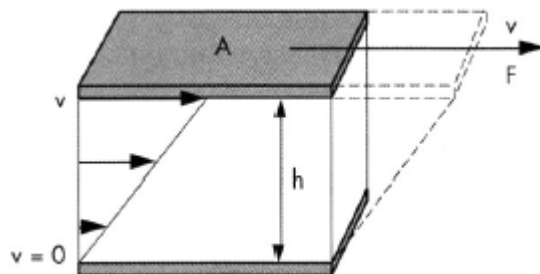


Abbildung 26 Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit im Spalt des Zwei-Platten-Modells für Scherversuche [44]

Durch das Aufbringen einer Kraft F an der oberen Platte kommt es zu einer Verschiebung mit konstanter Geschwindigkeit v der oberen Platte gegen die ruhende untere Platte. Die Bewegung der oberen Platte verursacht ebenfalls eine Bewegung der zwischen den Platten befindlichen Flüssigkeitsschicht. Aufgrund der Kohäsionskräfte bewirkt die Verschiebung der obersten Flüssigkeitsschicht auch Verschiebungen in den angrenzenden Schichten. Dieser Prozess wird auch als Scherung bezeichnet [36].

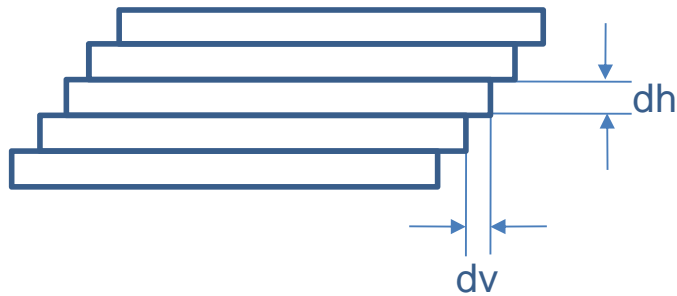


Abbildung 27 Ebene, laminare (schichtenförmige) Strömung einer Flüssigkeit [44]

Aus dem obigen Modell berechnet sich die Schubspannung τ [N/m²] in der Flüssigkeit aus dem Quotienten der Scherkraft F [N] und der Scherfläche A [m²] [36].

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Umgelegt auf den Mischprozess bedeutet dies, dass die „oberste“ Platte bzw. Flüssigkeitsschicht im direkten Kontakt zum Mischwerkzeug und die „unterste“ Flüssigkeitsschicht im direkten Kontakt zur Behälterwand steht.

Zwischen diesen beiden Flüssigkeitsschichten stellt sich hierbei eine Geschwindigkeitsdifferenz ein aus der die Scherrate berechnet werden kann [45].

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ [s⁻¹] ergibt sich aus dem Quotient der Geschwindigkeit v [m/s] und dem Abstand h [m] der beiden Flüssigkeitsschichten [36].

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h}$$

Die dynamische Viskosität einer Suspension lässt sich aus dem Quotienten der Schubspannung und der Scherrate bestimmen [36].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

„Ist die dynamische Viskosität unabhängig von der Scherrate (z.B. Wasser), handelt es sich um ein newtonsches Fließverhalten [...] [36]“

Weist die Flüssigkeit jedoch eine von einer Beanspruchung abhängige Viskosität auf, wird dies als nicht-newtonsches Fließverhalten bezeichnet.

Bei nicht-newtonschen Flüssigkeiten kann „[...] aufgrund des molekularen Aufbaus bzw. dem Vorliegen mehrerer Phasenanteile und deren Wechselwirkungen [...] die Viskosität nicht mehr als konstante Stoffgröße betrachtet werden [31]“.

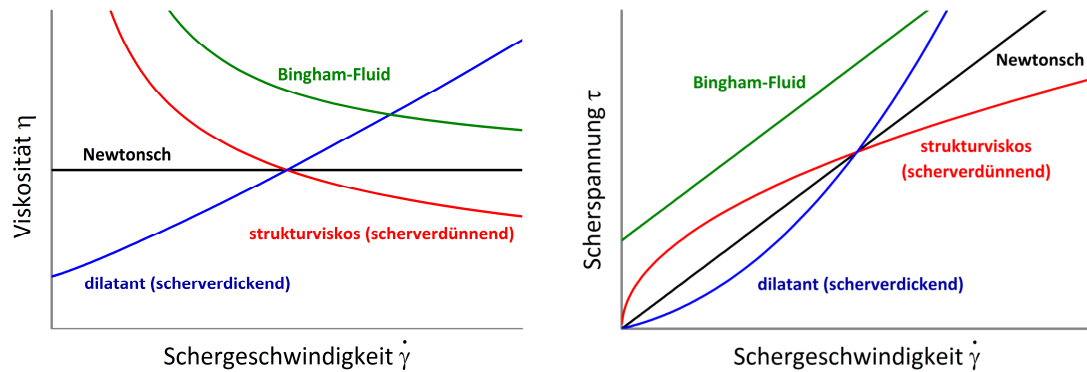


Abbildung 28 Qualitativer Verlauf bedeutender Viskositäts- (links) und Fließfunktionen (rechts) für unterschiedliches rheologisches Stoffverhalten [46]

Nicht newtonsche Flüssigkeiten bei denen die Viskosität mit steigender Scherrate abnimmt werden als strukturviskose Flüssigkeiten (z.B.: Polymerlösungen) bezeichnet. Nimmt die Viskosität einer Flüssigkeit hingegen mit steigender Scherrate zu wird diese als dilatant (z.B.: Stärkebrei) bezeichnet.

Bei nicht-newtonschen Fluiden weisen die Scherraten im Mischbehälter starke lokale Unterschiede auf, wodurch die Bestimmung einer dynamischen Viskosität und somit die Berechnung der Rührer-Reynolds-Zahl nicht möglich ist. Für die Ermittlung des Strömungszustandes in einem nicht-newtonschen Fluid ist daher eine repräsentative Viskosität zu ermitteln. Hierzu ist mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters die Viskosität eines Fluids bei verschiedenen Scherraten zu messen und das Fließverhalten des Fluids zu bestimmen [42].

Hinsichtlich des Fließverhaltens von Bindemittel- und Betonsuspension spielen Bingham-Fluide deren Viskositätsverhalten dem eines strukturviskosen Fluids entspricht (bi-lineare Näherung für das reale Fließverhalten von scherverdünnenden Fluiden) eine besondere Rolle. Im Gegensatz zu newtonschen Flüssigkeiten verhält sich ein Bingham-Fluid bis zum Erreichen einer bestimmten Grenzscherubspannung wie ein Festkörper und wird nur elastisch verformt (siehe Abbildung 28). Erst nach Überschreitung dieser Grenzscherubspannung (Fließgrenze) beginnt das Bingham-Fluid zu fließen und die Schubspannung steigt wie bei newtonschen Flüssigkeiten linear mit der Schergeschwindigkeit an. Die Höhe der Fließgrenze wird von den interpartikulären Kräften der Feststoffpartikel in der Suspension bestimmt (siehe Kapitel 2.1.4) und kann durch eine gesteigerte Flüssigkeitsmenge oder durch die Zugabe von Fließmittel beeinflusst werden [47].

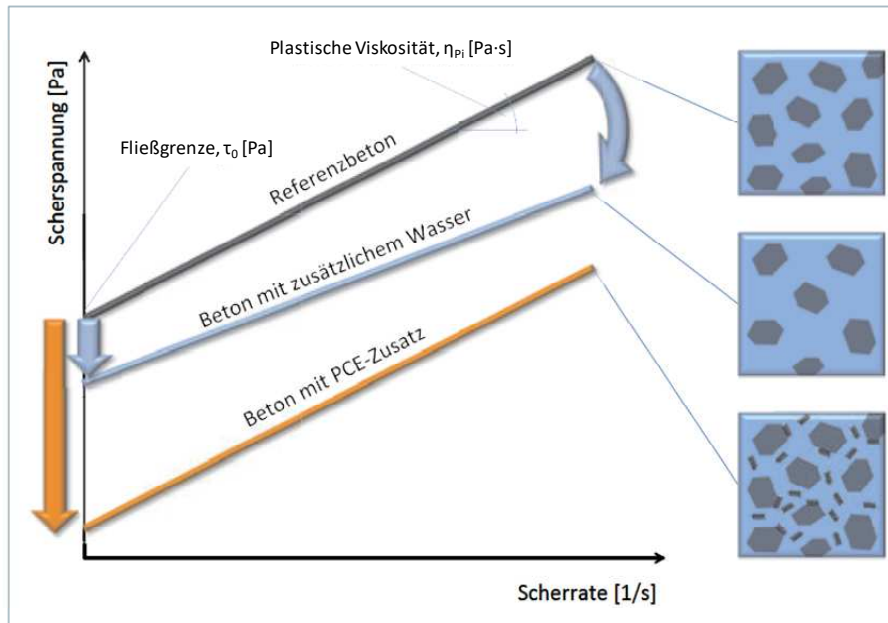


Abbildung 29 Einfluss von Wasser und hinzugefügtem Fließmittel auf die Fließparameter von Beton [20]

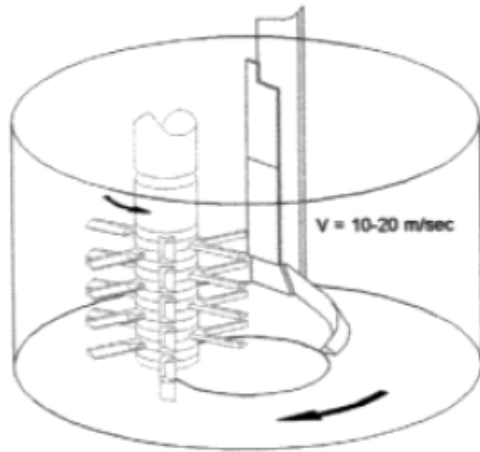
3.3 Einfluss des Mischwerkzeugs auf die Mischqualität

Bei der Herstellung von Suspensionen bzw. feuchten Partikelgemischen wird die Desagglomeration der granularen Ausgangsstoffe neben der Zugabe von chemischen Zusatzmitteln (Fließmittel) hauptsächlich von der Werkzeug- bzw. Schergeschwindigkeit und von der Ausbildung des Mischwerkzeugs bestimmt.

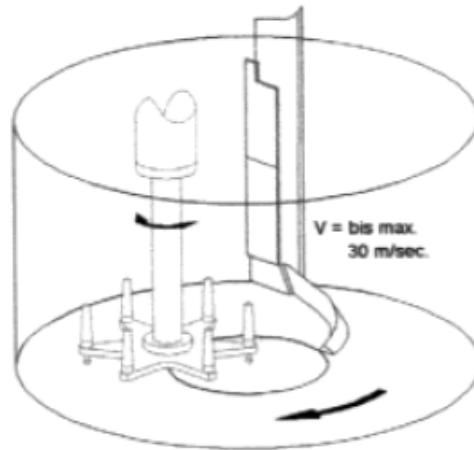
So führen beispielsweise verschiedene Mischwerkzeuge, die Veränderung der Drehfrequenz und die Umkehr der Drehrichtung zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Mischqualität.

Die Höhe der Scherkräfte ist neben der Werkzeuggeschwindigkeit maßgebend durch die Werkzeuggeometrie bestimmt. Je steiler (orthogonal) das Mischgut auf die Werkzeugflächen und -kanten trifft umso höher sind die eingebrachten Scherkräfte und der Desagglomerationseffekt [48]. Aus diesem Grund sind für unterschiedliche Mischaufgaben bestimmte Mischorgane eher geeignet als andere Mischwerkzeuge.

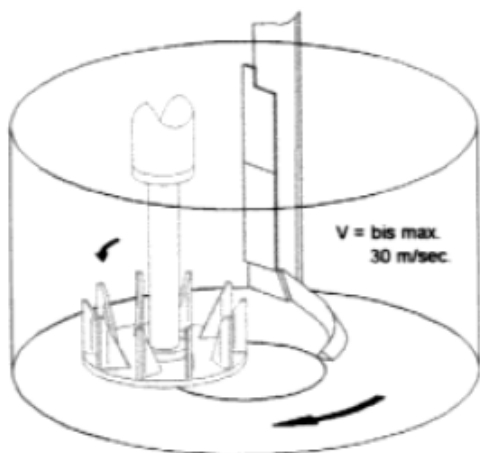
In Abbildung 30 sind hierzu die wirksamen Einsatzgebiete von Mischwerkzeugen mit unterschiedlichen Werkzeuggeometrien dargestellt.



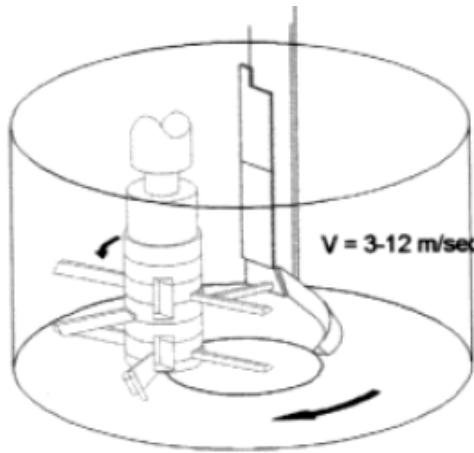
trocken-krümelige Massen



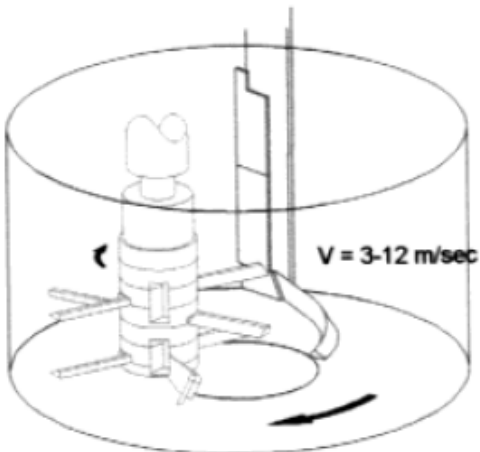
Pulver, Suspensionen, Emulsionen, Lösungen



Pulver und zur Mikrogranulation



Trocken bis feucht-krümelig
universell einsetzbar



Plastisch, pastösinkl. Knetmischungen

Abbildung 30 Einsatzgebiete unterschiedlicher Mischwerkzeuge [49]

Je nach Ausbildung der Werkzeuggeometrie können während des Mischprozesses von Suspensionen unterschiedliche Strömungsrichtungen erzeugt werden. Hierbei wird in Abhängigkeit der Primärströmung grundsätzlich zwischen axial, radial und tangential (bezogen auf die Werkzeugachse) wirkenden Mischwerkzeugen unterschieden (siehe Abbildung 31) [37].

Axial wirkende Mischwerkzeuge bewirken die Ausbildung eines axialsymmetrisch angeordneten Ringwirbels der den gesamten Mischbehälter umfasst. Die direkte Bodenanstömung durch den Ringwirbel verhindert ein Absetzen von Feststoffen am Behälterboden sodass sämtliche Feststoffe in der Suspension in Schwebelage gehalten werden [37].

Bei radial wirkenden Mischwerkzeugen wird das Mischgut primär radial nach außen zur Behälterwand gefördert. Anders als bei axial wirkenden Mischwerkzeugen, bilden sich hier zwei nach außen gerichtete Ringwirbel aus (unterhalb und oberhalb des Mischwerkzeugs), wobei ein Stoffaustausch zwischen den beiden Ringwirbeln nur beschränkt stattfindet. Schnelldrehende radial wirkende Mischwerkzeuge erzeugen ein sehr hohes Schergefälle an den Außenkanten des Mischwerkzeugs und tragen daher die Mischenergie sehr konzentriert in das Mischgut ein. Radial wirkende Rührer werden bevorzugt für Dispergierungsvorgänge eingesetzt [37].

Bei tangential wirkenden Mischwerkzeugen wird die Suspension in Bahnen um die Drehachse des Mischwerkzeugs bewegt.

Die jeweiligen Primärströmungsverläufe sind in Abbildung 31 dargestellt.

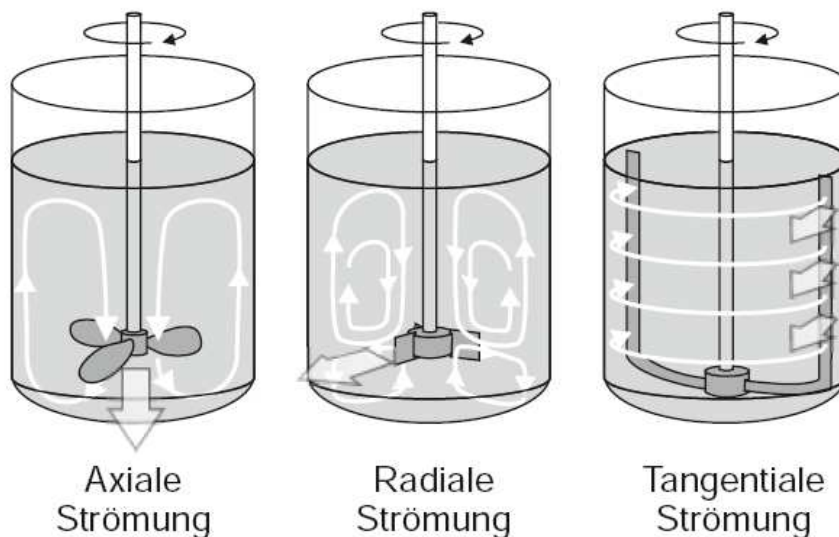


Abbildung 31 Primärströmung bei axial, radial und tangential wirkenden Mischwerkzeugen [50]

4 Mischen von UHPC – Stand der Technik

Die herausragenden Festbetoneigenschaften von Ultrahochleistungsbetonen hängen neben der Optimierung des Mischungsentwurfs sowie der Verarbeitungs- und Nachbehandlungsqualität auch vom Mischvorgang bzw. von der Mischtechnik ab [51].

Die verschiedenen Betonausgangsstoffe werden hierbei durch den Mischprozess mit dem Ziel, bestmögliche Frisch- und Festbetoneigenschaften zu erreichen, „[...] von einem Kornhaufwerk in eine granuläre Suspension überführt“ [36].

Hinsichtlich des Mischprozesses von Beton macht die ÖNROM B 4710-1 folgende Angaben:

„Das Mischen der Ausgangsstoffe muss in einem Mischer [...] erfolgen und solange dauern, bis die Mischung gleichförmig erscheint [15].“

„Die Mischer müssen in der Lage sein, mit ihrem Fassungsvermögen innerhalb der Mischdauer eine gleichmäßige Verteilung der Ausgangsstoffe und eine gleichmäßige Verarbeitbarkeit des Betons zu erzielen [15].“

Bei den meisten Mischsystemen rotieren dazu in einem Mischbehälter spezielle Mischwerkzeuge deren Aufgabe es ist, die einzelnen Mischungskomponenten gleichmäßig im gesamten Mischraum zu verteilen. Die Mischwerkzeuge sind so geformt und angeordnet, dass das gesamte Mischgut während dem Mischvorgang zwangsweise einer möglichst „turbulenten“ Bewegung ausgesetzt ist und die Mischwerkzeuge dabei einen ständigen horizontalen und vertikalen Materialaustausch bewirken.

Um eine bestmögliche, homogene Verteilung der unterschiedlichen Mischgutkomponenten mit ihren sehr unterschiedlichen Aggregatzuständen (pulverförmig, flüssig, körnig) zu erreichen, ist eine sehr hohe Mischenergie und eine entsprechend lange Mischzeit erforderlich. Insbesondere die homogene Verteilung und der bestmögliche Aufschluss der pulverförmigen Bestandteile (Zement, Mikrosilika, Gesteinsmehle) im Anmachwasser stellen höchste Anforderungen an die Mischintensität.

In handelsüblichen Mischern (z.B.: Planetenmischer) sind sehr lange Mischzeiten erforderlich, damit die pulverförmigen Ausgangsstoffe mit ihren sehr großen spezifischen Oberflächen (insbesondere Mikrosilika mit 150.000 - 350.000 cm²/g) homogen in der Mischung verteilt und dabei durch die Mischgutreibung (innere Reibung) kolloidal aufgeschlossen werden.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass die „klassischen“ Mischsysteme die Ausgangsstoffe und Rezepturen von Ultrahochleistungsbetonen mit ihren hohen Feinstoffanteilen und ihrer zähflüssigen, klebrigen Konsistenz meist nicht optimal und in ausreichender Qualität verarbeiten können.

Einige Systeme benötigen dazu unwirtschaftlich lange Mischzeiten, was zu hohem Verschleiß, hohem Energieverbrauch und geringer Durchsatz-

leistung führt, andere dagegen können diese Mixturen überhaupt nicht verarbeiten [52].

4.1 Bauarten von Betonmischern

Nach der DIN 459 sind Betonmischer in absatzweise arbeitende Mischer (Mischung einzelner Chargen) und stetig arbeitende Mischer zu unterteilen. Bei den absatzweise arbeitenden Mixern ist des Weiteren zwischen Freifall- und Zwangsmischern (Schub- und Wurfmischer) zu unterscheiden.

„Freifallmischer nutzen ausschließlich die Schwerkraft zur Bewegung des Mischgutes aus“ [53]. Sie „[...] bestehen aus einer sich drehenden Mischtrommel mit eingebauten Misch- und Leitblechen. Füllen und Entleeren kann durch Drehrichtungsänderung (Umkehrtrommel) oder Kippen der Trommel (Kipptrommel) erfolgen [54]“. Ein typisches Beispiel für einen Freifallmischer stellt der klassische Fahrmischer mit rotierender Mischtrommel dar [53].

Bei Zwangsmischern erfolgt die Durchmischung der Zuschlagsstoffe durch das zwangsweise Drehen der Mischwerkzeuge um die vertikale (Tellerischer) oder die horizontale Achse (Trogmischer) [54].

Für die Betonproduktion typische Vertreter der Tellerischer sind Planetenmischer. Bei Trogmischern wird zwischen einwelligen- oder zweiwelligen Ausführungen (Doppelwellen-Mischer) differenziert.

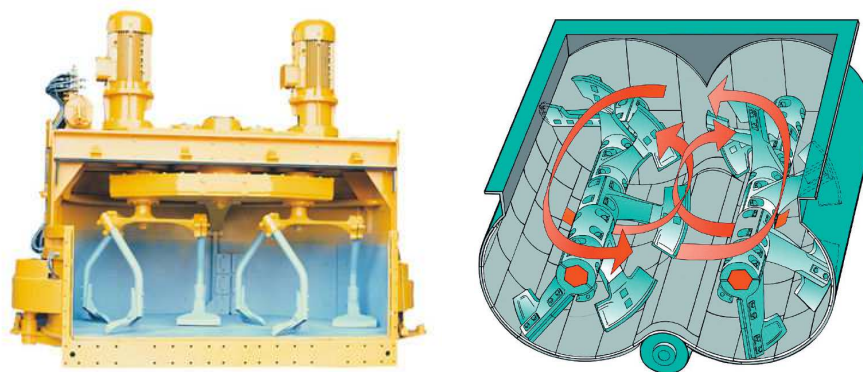


Abbildung 32 Schnitt durch einen Planetenmischer (links) [55] und durch einen Doppelwellen-Mischer (rechts) [56]

Tellerischer können in Abhängigkeit der Mischaufgabe unterschiedlich konfiguriert werden. So kann die Mischwelle zentrisch oder exzentrisch angeordnet sein. Eine weitere Modifikation stellt die Ausbildung des Mischtellers bzw. des Wandabstreifers (ruhend oder rotierend) dar.

Die verschiedenen Konfigurationsarten (in Anlehnung an [57]) von Tellermischern sind in Abbildung 33 dargestellt.

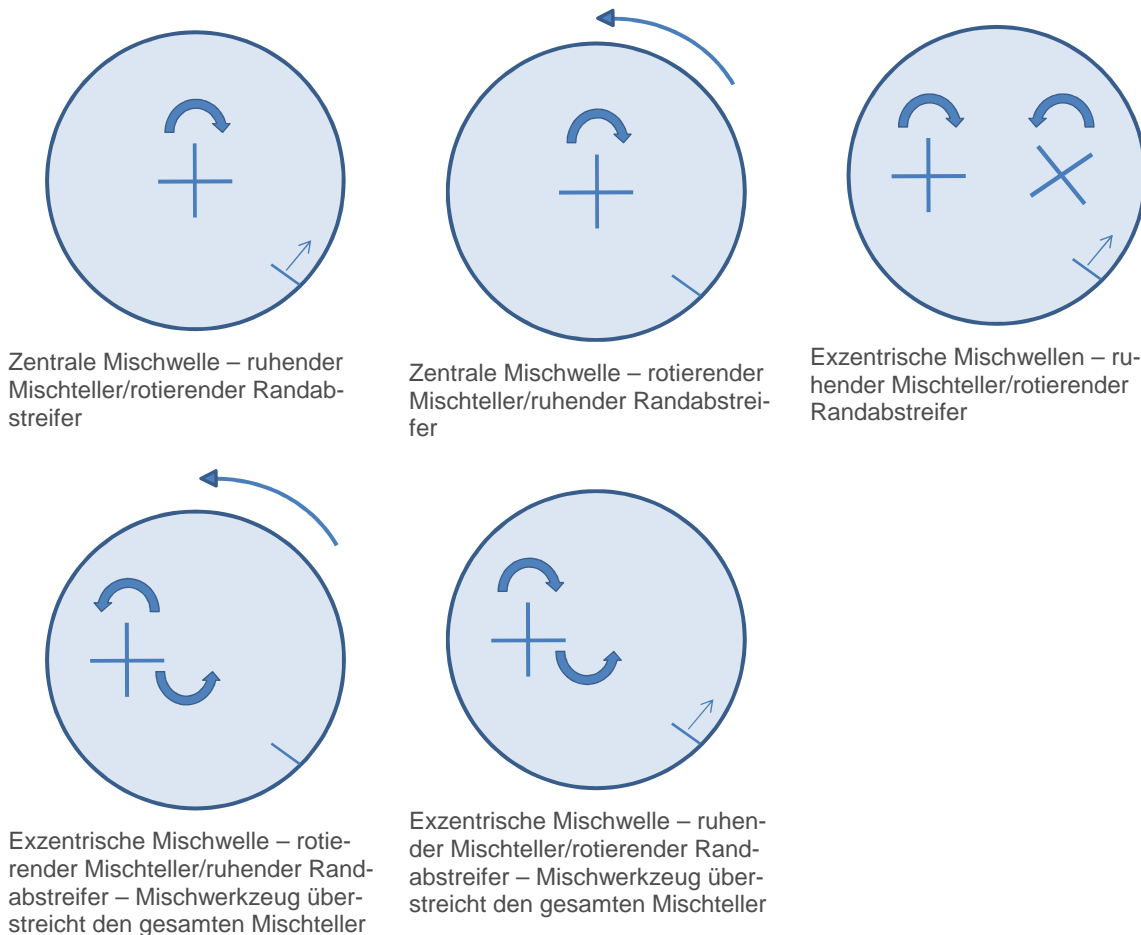


Abbildung 33 Konfigurationsarten von Betonmischer

Das Mischprinzip bei Zwangsmischern beruht darauf, dass das Mischgut durch die rotierenden Mischwerkzeuge gezielt beschleunigt und relativ zueinander bewegt wird. Dabei sind in Abhängigkeit der Mischwerkzeuge (Mischpaddel, Schnecke, Wirbler etc.) unterschiedliche Bewegungszustände möglich. Zwangsmischer werden hinsichtlich des Bewegungszustandes des Mischguts in Schub- oder Wurfmischer eingeteilt.

Die Einteilung ob die Mischwirkung durch Umherschleifen des Mischguts über den Behälterboden oder durch Umherschleudern des Mischguts im Mischbehälter erfolgt, wird anhand der Froude-Zahl bestimmt.

Die Froude-Zahl stellt eine dimensionslose Größe dar, die das Verhältnis zwischen Zentrifugalkraft und Gewichtskraft beschreibt [36]. Da sich die Beschreibung der Partikelbewegung im Mischbehälter (Partikel-Froude-Zahl) als technisch sehr aufwendig erweist, ist zur Beschreibung des Bewegungszustandes des Mischguts die Maschinen-Froude-Zahl als Näherung besser geeignet [58].

In die Maschinen-Froude-Zahl gehen keine Material- oder Geschwindigkeitsparameter des Mischguts ein. Die Beschreibung der Zentrifugalkraft erfolgt ausschließlich anhand der Geometrie und der Drehgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs, wodurch eine vereinfachte Betrachtung des Bewegungsstromes im Mischgut stattfindet [36].

$$Fr_M = \frac{r \times \omega^2}{g} = \frac{r \times n^2 \times 4 \times \pi^2}{g}$$

Maschinen-Froude-Zahl Fr_M [-]

r Radius der Mischwelle

ω^2 Winkelgeschwindigkeit

n Werkzeugumdrehungen pro Sekunde

π Kreiszahl

g Gravitationsbeschleunigung

Grundsätzlich kann hinsichtlich der Maschinen-Froude-Zahl zwischen drei unterschiedlichen Mischertypen unterschieden werden.

- $Fr < 1$
- $Fr > 1$
- $Fr \gg 1$

Ist die Maschinen-Froude-Zahl kleiner als der Wert 1, finden im Mischbehälter reine Schubbewegungen statt. Bei Mixern mit $Fr < 1$ ist die Beanspruchung auf das Mischgut aufgrund der niedrigen Werkzeuggeschwindigkeit gering. Eine Desagglomeration des Mischguts ist daher nicht bzw. nur nach äußerst langer Mischzeit möglich [32].

Bei einem Wert knapp größer 1 führt die höhere Werkzeuggeschwindigkeit dazu, dass die Zentrifugalkraft die Gewichtskraft der Partikel überschreitet und es teilweise zu einem Übergang von einer Schubbewegung der Partikel in eine Flugbewegung kommt [32], [35].

Bei Mixern mit Maschinen-Froude-Zahlen $Fr \gg 1$ kommt es zu einer starken Zunahme der Scherkräfte auf das Mischgut. Eine hohe Froude-Zahl wirkt sich daher positiv auf die Radial- und Axialvermischung aus und führt damit zu einer deutlichen Intensivierung des Mischprozesses [31]. Aufgrund der hohen Werkzeuggeschwindigkeiten (hohen Froude-Zahl) herrscht zwischen den Mischgutpartikeln eine hohe Anprallbeanspruchung die zu einer weitgehenden Desagglomeration im Mischgut führt [32].

Während Schubmischer ($Fr < 1$) wie beispielsweise Planetenmischer ohne zusätzlichen Wirbler, das Mischgut ausschließlich zweidimensional bewegen ohne dabei einzelne Partikel aus der Matrix zu schleudern (konvektives Mischen), werden bei Wurfmixern ($Fr > 1$) in Abhängigkeit der Werkzeuggeschwindigkeit mechanische Wirbelschichten erzeugt. Diese führen dazu, dass sich im Mischbehälter wie beispielsweise beim Doppelwellen-Mischer oder bei Mixern mit Wirbler ein dreidimensionaler Bewegungszustand ausbildet, einzelne Partikel aus der Mischgutmatrix herausgeschleudert werden und anschließend ortsversetzt wieder in das Mischgut zurückfallen (dispersives Mischen) [53].

Durch die Verwendung von Wurfmixern mit Wirblern kann die Maschinen-Froude-Zahl auf $\gg 1$ gesteigert werden und somit hohe Scherkräfte

die zur Desagglomeration von Partikelgranulaten führen, in das Mischgut eingebracht werden.

Im Gegensatz zu Chargenmischern erfolgt bei Durchlaufmischern die Betonproduktion kontinuierlich. Die Betonausgangsstoffe werden hierzu auf der einen Seite dem Mischer zugegeben. Anschließend durchlaufen sie aufgrund der Schrägstellung der Mischerschaufeln und unter Zugabe von Wasser den Mischer. Die permanente Entleerung des Frischbetons erfolgt auf der gegenüberliegenden Seite des Mixers [54].

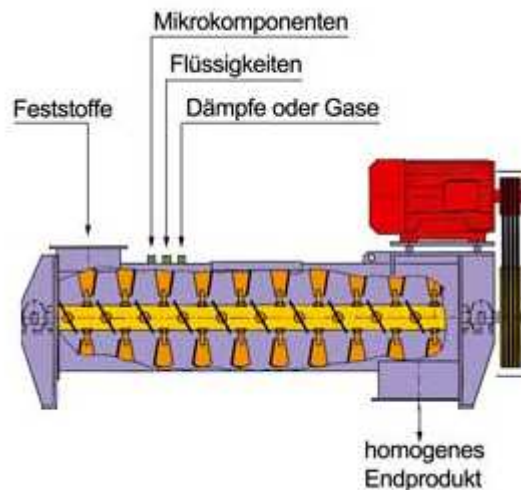


Abbildung 34 Schematische Darstellung eines Durchlaufmischers [59]

Durchlaufmischer werden hauptsächlich für die Herstellung von Massenbeton wie etwa Unterbeton oder hydraulisch gebundene Tragschichten im Straßenbau verwendet.

4.2 Anforderungen an die Mischtechnik zur Herstellung von Ultrahochleistungsbeton

Die Anforderungen an die Mischtechnik bzw. an ein Mischersystem liegen darin, die unterschiedlichen Betonausgangsstoffe so gleichmäßig wie möglich zu vermengen ohne dabei eine Stoffgruppe aufgrund ihrer Rohdichte, Kornform oder Volumenanteile zu begünstigen.

Die Art der Betonausgangsstoffe bzw. deren Stoffanteil in der Rezeptur von Ultrahochleistungsbetonen haben einen entscheidenden Einfluss auf die dispersiven und konvektiven Mischvorgänge im Mischgut und bestimmen daher entscheidend die Dauer des Mischvorgangs [36].

Bedingt durch den bei der Herstellung von UHPC geringen Wassergehalt und der großen Menge an Zusatzstoffen mit einem Partikeldurchmesser kleiner $10\ \mu\text{m}$ (Mikrofüller), kommt es aufgrund der großen Oberfläche der Zusatzstoffe beim Mischen zu starken Anziehungskräften zwischen den Mischgutpartikeln [35].

Diese interpartikulären Adhäsionskräfte verursachen Festkörper- und Flüssigkeitsbrücken und begünstigen die Vereinigung von benachbarten

Feststoffpartikeln zu Agglomeraten [5] (siehe Kapitel 3.1.4). Durch die Agglomeration werden die Platzwechselforgänge der einzelnen Partikel während des Mischprozesses erschwert und die Frisch- und Festbetoneigenschaften deutlich vermindert. Für hohe Betonqualitäten sind die Agglomerate daher möglichst vollständig aufzulösen und die Oberflächen der einzelnen Partikel mit Wasser und Fließmittelmolekülen zu benetzen, um damit eine neuerliche Agglomeration zu vermeiden und die notwendige Fließfähigkeit des Frischbetons zu gewährleisten [35].

Damit die Agglomerate während des Mischprozesses weitestgehend aufgelöst werden, muss UHPC im Vergleich zu Normalbeton mit deutlich höheren Werkzeuggeschwindigkeiten gemischt werden [36]. Da hohe Werkzeuggeschwindigkeiten zu einem erhöhten Leistungseintrag und damit zur Erwärmung des Mischguts führen, ist während des Mischprozesses darauf zu achten, dass die Frischbetontemperatur nicht über 30°C ansteigt und so ein frühzeitiges Ansteifen des Frischbetons gefördert wird [60].

Untersuchungen von SAFRANEK und LIEBLANG zeigen darüberhinaus, dass neben der Werkzeuggeschwindigkeit die Mischqualität und die Mischzeit von UHPC auch durch die Auswahl des Mischwerkzeugs bzw. durch dessen Werkzeuggeometrie deutlich beeinflusst werden kann.

SAFRANEK und LIEBLANG verglichen hierbei die Mischwirkung eines Sternwirlers (siehe Abbildung 56) bei dem horizontal angeordnete Flügel Schneide- und Prallbewegungen im Mischgut erzeugen, mit einem Stiftenwirlers, der durch vertikal angeordnete Stifte hohe Scherkräfte in das Mischgut einbringt [11], [61].

Hinsichtlich des Strömungsverlaufs erzeugt der Sternwirlers einen radialen und der Stiftenwirlers einen axialen Mischeffekt [62].

Bei beiden Untersuchungen stellte sich heraus, dass der Stiftenwirlers im Vergleich zum Sternwirlers zu einer höheren Leistungsaufnahme des Antriebsmotors führt und somit mehr Mischarbeit in das Mischgut eingebracht wird. Der höhere Leistungseintrag hat zur Folge, dass bei gleicher Mischqualität die Mischzeit mit dem Stiftenwirlers kürzer ausfiel bzw. bei gleicher Mischzeit die Frisch- und Festbetonqualitäten der mit dem Stiftenwirlers gemischten Betone höhere Qualitäten erreichten [11], [61].

4.2.1 Mischphasen von UHPC

CAZACLIU gliedert den Mischprozess von Feinkorn-UHPC von der Bildung bis zur Auflösung von Granulaten (Zusammenschluss mehrerer Agglomerate durch Flüssigkeitsbrücken) in vier Mischphasen [5].

- Granulat-Wachstum
- Granulat-Koaleszenz
- Granulat-Auflösung
- Agglomerat-Dispersion

Hinsichtlich der Zugabereihenfolge werden bei CAZACLIU die gesamten Mischkomponenten vor Beginn des Mischprozesses in den Mischbehälter eingebracht.

In der ersten Phase kommt es aufgrund des sehr geringen Flüssigkeitsgehalts und der aus der hohen Packungsdichte bedingten großen Partikeloberfläche zu einem Ansammeln der feinsten Feststoffpartikel um die Flüssigkeitstropfen und damit zur Ausbildung und zum Wachstum von Granulaten. Die dadurch entstehenden Flüssigkeitsbrücken führen zu einem beträchtlichen Anstieg der Antriebsleistung des Mischwerkzeugs. In weiterer Folge führt die hohe Werkzeuggeschwindigkeit des Mixers dazu, dass das Mischgut umgewälzt wird, wodurch die größeren Partikel umgeschichtet werden und die Partikelzwischenräume durch immer kleinere Partikel ausgefüllt werden. Dies führt dazu, dass die von den Feststoffpartikeln eingeschlossene Flüssigkeit an die Oberfläche gedrängt wird und sich weitere Feststoffpartikel anlagern [35],[5].

Die Granulatgröße wird vom Wassergehalt und dem aktuellen volumetrischen Feststoffgehalts der Mischung bestimmt [5].

Im weiteren Verlauf des Mischprozesses wird in Phase zwei die Oberfläche der Granulate infolge von Konsolidierung zunehmend befeuchtet und das Anhaften anderer Granulate gefördert.

Als Konsolidierung wird hierbei der durch die Mischenergie verursachte Verdichtungsprozess, wodurch die im Agglomeratkern befindliche Flüssigkeit an die Partikeloberfläche gepresst wird und durch die erneute Oberflächenbefeuchtung ein weiteres Anlagern von einzelnen Feststoffpartikel bzw. Agglomeraten ermöglicht wird, verstanden [63].

Die Vereinigung der Granulate führt neben der Zunahme der Granulatgröße auch zu einer Steigerung der erforderlichen Antriebsleistung des Mischwerkzeugs. Das Anwachsen und die Vereinigung der Granulate führt dazu, dass in der zweiten Mischphase der Energiebedarf des gesamten Mischvorgangs am höchsten ist [35].

In der dritten Phase des Mischprozesses von UHPC wird durch die hohe Mischenergie und der damit verbundenen Scherung der Granulate die eingeschlossene Flüssigkeit freigesetzt. Die freigesetzte Flüssigkeit führt dazu, dass durch die Füllung der Granulatzwischenräume die Kohäsionskräfte reduziert werden, die Granulate aufgelöst werden und das Mischgut in einzelnen Teilbereichen vom Kornhaufwerk in eine Suspension übergeht. Des Weiteren kommt es in Phase drei des Mischprozesses zu einer Abnahme der Antriebsleistung [35].

Die vierte Phase des Mischprozesses zeichnet sich durch eine weitgehende Auflösung der Agglomerate aus. Trotz des Übergangs des Kornhaufwerks zur Suspension (Ende Mischphase drei) befinden sich aber aufgrund von interpartikulären Wechselwirkungen weiterhin Agglomerate, welche die Homogenität der Mischung und damit die Frisch- und Festbetoneigenschaften reduzieren, im Mischgut.

In Mischphase vier findet somit eine umfassende Desagglomeration der Feinststoffe, die sich durch die Abnahme der Fließgrenze des Mischguts

und ein Absinken der Antriebsleistung des Mischwerkzeugs auszeichnet, statt [35].

In Abbildung 35 ist die Entwicklung sowie die Schwankungen der Leistungsaufnahme über die vier Mischphasen dargestellt.

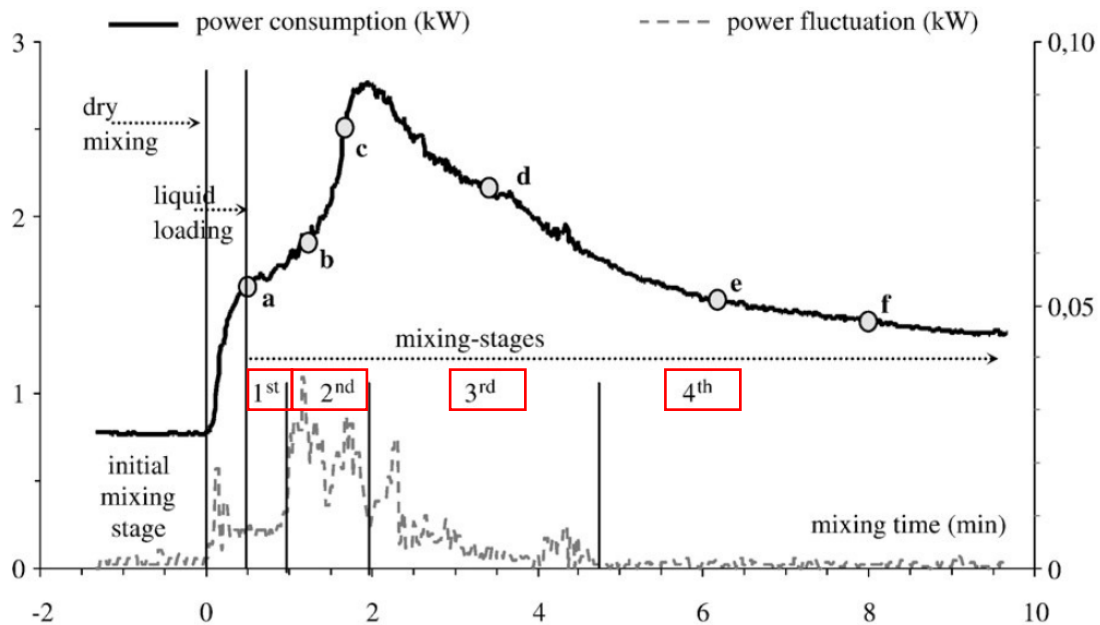


Abbildung 35 Entwicklung und Schwankungen der Leistungsaufnahme eines Labor-Doppelwellen-Mischer während der Herstellung eines Feinkorn-UHPC [64]

Die verschiedenen Stadien des Mischungsfortschritts bei der Herstellung von Feinkorn-UHPC sind in Abbildung 36 dargestellt:

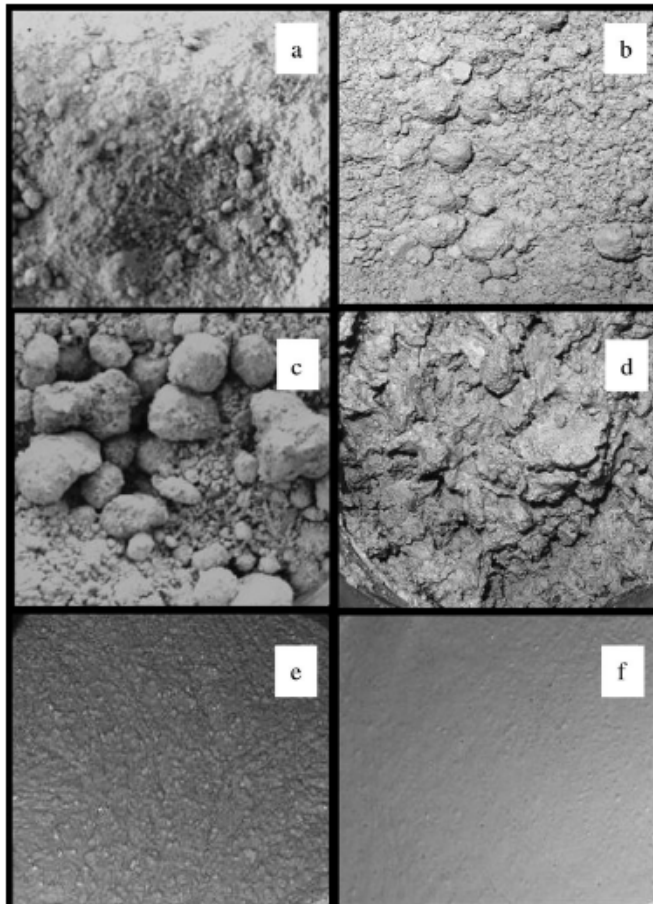


Abbildung 36 Stadien des Mischprozesses von Feinkorn UHPC in einem Labor-Doppelwellen-Mischer [64]

4.2.2 Charakterisierung der Mischgüte

Für ein angemessen hohes Fließverhalten des Frischbetons und eine möglichst optimal homogene Mikrostruktur des Festbetons sind sämtliche Betonausgangsstoffe mit einer ausreichend hohen Mischenergie und einer ausreichend langen Mischzeit miteinander zu vermischen.

Da eine messtechnische Ermittlung der während des Mischprozesses im Mischgut ablaufenden Mechanismen nicht möglich ist, sind anderweitige Methoden erforderlich, um den Mischprozess bzw. die Mischgüte zu quantifizieren [5].

4.2.2.1 Statistische Beurteilung der Mischgüte als Indikator des Mischergebnisses

Eine Möglichkeit um die Mischgüte zu bestimmen stellt die statistische Beurteilung einer Mischprobe dar. Hierzu sind aus der zu beurteilenden Mischung ausreichend große Proben zu entnehmen, der Zementleim auszuwaschen und die Gesteinskörnungen auszusieben. Nach anschließender Trocknung sind die Proben der einzelnen Gesteinskörnungen entsprechend ihrer Kornfraktionen zu unterteilen und zu wiegen.

Die Mischqualität ist dabei umso höher, je geringer die Abweichungen der Probenkonzentration von der Konzentration der Gesamtmischung sind. Eine möglichst geringe Varianz bzw. Stichprobenvarianz zwischen den Proben ist daher ein Anzeichen einer hohen Mischgüte [11].

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

Stichprobenvarianz S^2

S^2 Stichprobenvarianz

n Anzahl der Proben

μ Mittelwert der Konzentrationen

x_i beobachtete Konzentration in der i-ten Probe

Die Bestimmung der Homogenität erfolgt über die Verteilung der Gesteinskörnungen mittels Standardabweichung und Variationskoeffizienten in der Mischung [5].

$$V_x = \frac{S}{\mu}$$

Variationskoeffizient V_x

V_x Variationskoeffizient [%]

S Standardabweichung

μ Mittelwert

Zur Beurteilung der Mischqualität von UHPC erscheint diese Methode jedoch als nicht geeignet, da die Verteilung der Feinststoffanteile aufgrund ihrer geringen Partikeldurchmesser versuchsstechnisch nicht mehr bestimmt werden kann [5].

4.2.2.2 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Eine einfache Methode zur Bestimmung der Qualität einer UHPC Mischung stellt die Beurteilung der Frisch- und Festbetoneigenschaften dar.

„Da die makroskopischen Eigenschaften von Beton durch seine Zusammensetzung bestimmt werden, ist anzunehmen, dass sich die Homogenität von Beton an Probekörpern, die nach unterschiedlichen Mischzeiten und -abläufen hergestellt werden, beurteilen lässt. Unter der Voraussetzung, dass bei optimalen Frisch- und Festbetoneigenschaften auch ein optimales Mischergebnis vorliegt, ist somit anhand der Frisch- und Festbetoneigenschaften eine punktuelle Begutachtung des Mischprozesses möglich.“ [5]

Die Beurteilung der Frisch- und Festbetoneigenschaften gibt jedoch keine direkten Rückschlüsse ob in der Mischung die größtmögliche Homogenität vorliegt. Es lässt sich indes nur vermuten, dass mögliche Inhomogenitäten die Betoneigenschaften verschlechtern [5]. Dennoch stellen sie einen hilfreichen Maßstab zur Beurteilung der relativen Mischqualität dar.

4.2.2.3 Messung der elektrischen Antriebsleistung des Mischwerkzeugs

Da die Scherfestigkeit und die Kohäsionsfestigkeit des Mischgutes proportional zur Leistungsaufnahme bzw. zum Drehmoment des Mischwerkzeugs sind, ist nach MAZANEC die Aufzeichnung der elektrischen Antriebsleistung des Mischwerkzeugs die zweckmäßigste Methode, um die im Mischgut ablaufenden Mechanismen bzw. die Mischgüte zu beurteilen [5].

Durch den Zusammenhang zwischen Leistungseintrag, Kraft und Werkzeuggeschwindigkeit geht hervor dass der Leistungseintrag in das Mischgut mit steigender Geschwindigkeit erhöht wird [11].

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} = \frac{\text{Kraft} \times \text{Weg}}{\text{Zeit}} = \text{Kraft} \times \text{Geschwindigkeit}$$

Die in das Mischgut eingetragene Mischenergie entspricht der Fläche unter der Leistungskurve des Mischwerkzeugs und kann somit durch die Integration der Leistungsaufnahme über die Zeit bestimmt werden [61].

$$E = \int P \times dt$$

Mischenergie E

E Mischenergie [kWh]

P Leistung [kW]

t Mischdauer [h]

Der Vorteil dieser Methode gegenüber den vorhin dargestellten Methoden ist, dass die Mischgutqualität bereits während des Mischprozesses bewertet werden kann.

Das Protokollieren der Mischleistung durch die Aufzeichnung der Leistungskurve ermöglicht es, die unterschiedlichen Phasen der Flüssigkeitsverteilung im Mischgut während des Mischprozesses darzustellen (siehe Kapitel 4.2.1) und die Entwicklung der Materialeigenschaften während des Mischprozesses zu beurteilen.

4.3 Maschinentechnische und betontechnologische Einflüsse auf die Mischzeit von UHPC

Nach CHOPIN et.al kann anhand der Leistungskurve der Mischenergie der Zeitpunkt ab dem im Mischgut die optimalen Betoneigenschaften vorliegen, bestimmt werden.

Optimale Betoneigenschaften liegen demnach zu jenem Zeitpunkt vor, ab dem die Leistungsaufnahme des Mischwerkzeugs nach dem Erreichen der maximalen Antriebsleistung ein horizontales Plateau ausbildet [65] (siehe Abbildung 37).

Für die Entwicklung der Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit der Mischzeit, kann der Mischprozess nach LOWKE in die drei Mischphasen Dispergierung, Optimum und Übermischung eingeteilt werden [66].

In der ersten Phase (Dispergierung) erfolgt aufgrund der Wasser- und Fließmittelzugabe ein quasi linearer Leistungsanstieg des Mischwerkzeugs. Durch den verstärkten Aufschluss von Wasser und Fließmittel ergibt sich mit zunehmender Mischzeit der Übergang vom Partikelhaufwerk zur Suspension. Mit dem Erreichen der maximalen Leistungsaufnahme herrscht die maximale Kohäsion im Gemisch und es beginnt der Zerfall der Partikelgranulate durch den Ausfall der Kapillarkräfte. Dieser Ausfall der Kapillarkräfte führt zu einem asymptotischen Absinken der Leistungsaufnahme. Mit dem Erreichen der horizontalen Tangente (Phase zwei), ergibt sich die maximale Fließfähigkeit der Suspension und es kann eine weitgehende Homogenisierung der Betonausgangsstoffe angenommen werden [66].

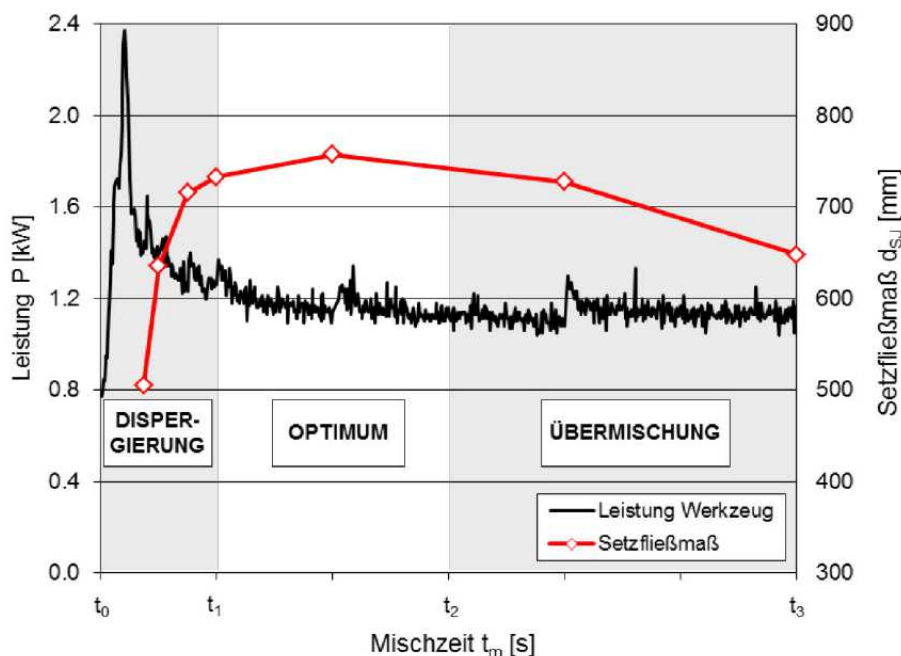


Abbildung 37 Zusammenhang zwischen der Mischleistung P und des Setzfließmaßes $d_{s,j}$ für selbstverdichtenden Beton [66]

Für eine möglichst kurze Nassmischzeit ist vor allem während der Anfangsmischzeit (Zeit bis zum Erreichen der maximalen Leistungsaufnahme) darauf zu achten, mit einer möglichst hohen Werkzeugge-

schwindigkeit zu mischen. Nach VICKERS et.al. hängt die Adsorptionsgeschwindigkeit des Fließmittels neben der chemischen Struktur des Fließmittels (Länge der Hauptkette, Anzahl der Seitenketten etc.) auch von der Werkzeuggeschwindigkeit (hohe Werkzeuggeschwindigkeiten tragen dazu bei, dass die Fließmittelmoleküle zu einem höheren Grad auf den Zementpartikeln adsorbieren) ab [67].

Hohe Werkzeuggeschwindigkeiten führen demzufolge neben der schnellen und weiträumigen Verteilung der Partikel im Mischgut auch zu einer früheren Adsorption des Fließmittels und daher zu einer Reduktion der Mischzeit [68].

Des Weiteren gelingt nur durch sehr hohe Drehzahlen des Mischwerkzeugs in der Dispergierungsphase ein kolloidaler Aufschluss der Feinststoffe, wodurch die Qualität der Suspension hinsichtlich der Fließeigenschaften gesteigert aber auch in Hinblick auf die Minimierung von Störstellen (Feinststoffagglomeraten) verbessert werden kann.

Nach dem Erreichen der maximalen Leistungsaufnahme (Übergang von einer kohäsiven Paste in eine Suspension) wird empfohlen die Werkzeuggeschwindigkeit zu reduzieren um einerseits einen zu starken Abrieb der Materialien bzw. der Hydratationsprodukte entgegenzuwirken und andererseits einen unnötig hohen Energieeintrag (die Feststoffpartikel sind nach dem Erreichen der maximalen Leistungsaufnahme weiträumig suspendiert) zu verhindern. Durch die Reduktion der Werkzeuggeschwindigkeit nach Erreichen der maximalen Leistungsaufnahme, wird des Weiteren eine zu starke Erwärmung des Frischbetons vermieden.

4.3.1 Stabilisationszeit

Da nach Kapitel 4 die Leistungsaufnahme des Mischwerkzeugs mit den Betoneigenschaften korreliert, kann die notwendige Mischzeit bis zum Erreichen der bestmöglichen Verteilung der Feststoffe in der Suspension (Stabilisationszeit t_s) mit Hilfe der elektrischen Antriebsleistung bestimmt werden [69].

Eine mathematische Beschreibung der Leistungskurve kann nach MAZANEC et. al. durch folgende Formel (normierte Mischleistung) erfolgen [5]:

$$P = P_0 + P_1 e^{\left(\frac{-t}{t_1}\right)} + P_2 e^{\left(\frac{-t}{t_2}\right)}$$

P Gesamte Mischleistung

P_0 Mischleistung zum Zeitpunkt t_0

P_1 Mischleistung bis zur maximalen Leistungsaufnahme

P_2 Mischleistung nach der maximalen Leistungsaufnahme

t_1 Mischzeit bis zur maximalen Leistungsaufnahme

t_2 Mischzeit nach der maximalen Leistungsaufnahme

Wobei die Stabilisationszeit t_s nach MAZANEC jene Zeit darstellt, bei der die Kurvensteigerung der Leistungsaufnahme des Mixers $\varepsilon = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P(t_s)}{P_\infty} \right)$ einen Wert von $\varepsilon = 4 \times 10^{-4} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ erreicht [68] (siehe Abbildung 38).

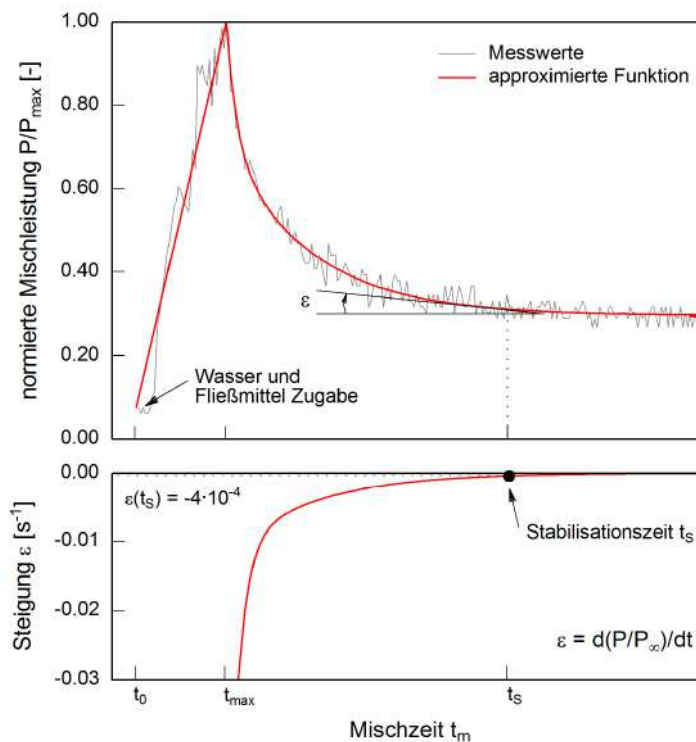


Abbildung 38 Normierte Darstellung der Leistungsaufnahme (P/P_{\max}) des Mischwerkzeugs und Berechnung der Stabilisationszeit t_s [5]

Mit dem Erreichen der Stabilisationszeit t_s sind nach MAZANEC sämtliche Betonausgangsstoffe bestmöglich homogenisiert, alle Feststoffpartikel von Flüssigkeit umgeben und das gesamte Fließmittel vollständig im Mischgut verteilt, sodass optimale Betoneigenschaften zu erwarten sind [70].

Da ab mit dem Erreichen der Stabilisationszeit von einer weitgehenden Dispergierung der Betonausgangsstoffe ausgegangen werden kann, ist die Bestimmung der Stabilisationszeit ein geeignetes Verfahren, um die kürzest mögliche Mischzeit für unterschiedliche Betonrezepturen miteinander zu vergleichen [70].

Die Einflussgrößen auf die Misch- bzw. auf die Stabilisationszeit von Ultrahochleistungsbetonen sind in Abbildung 39 dargestellt.

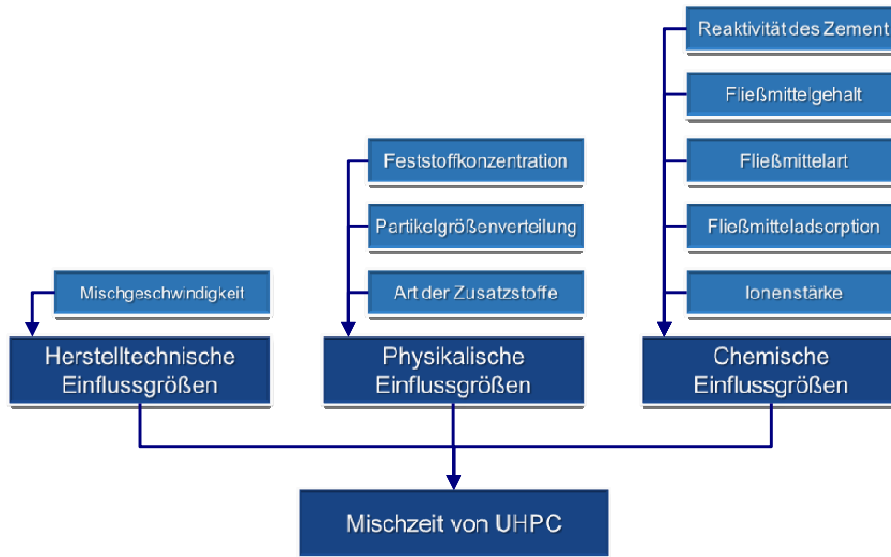


Abbildung 39 Einflussgrößen auf die Mischzeit von UHPC (in Anlehnung an [5])

4.3.2 Einfluss der Werkzeuggeschwindigkeit auf die Mischzeit

Untersuchungen von MAZANEC zeigen, dass die Werkzeuggeschwindigkeit einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtmischzeit besitzt.

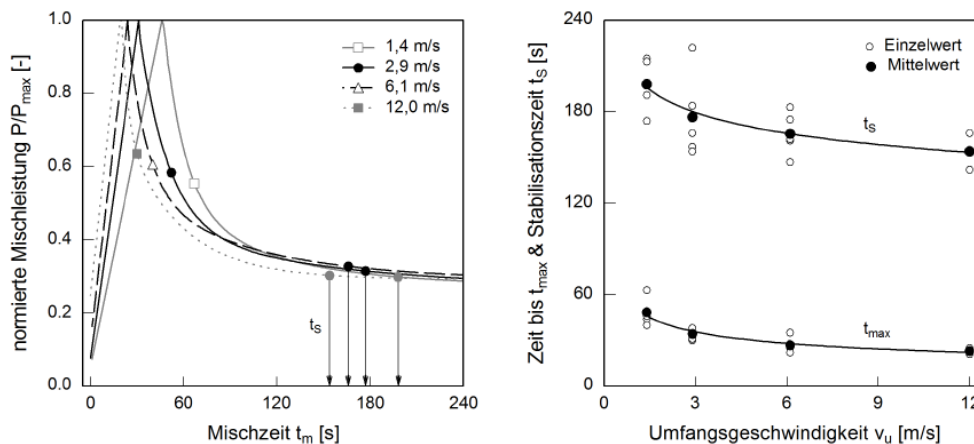


Abbildung 40 Einfluss der Werkzeuggeschwindigkeit auf die Stabilisationszeit [5]

Durch die Herstellung von UHPC bei unterschiedlichen Werkzeuggeschwindigkeiten wurde festgestellt, dass vor allem in der Zeit bis zum Erreichen der maximalen Leistungsaufnahme (t_{max}) durch hohe Werkzeuggeschwindigkeiten die Gesamtmischzeit erkennbar verkürzt werden kann [5].

Der Grund liegt darin, dass bei höheren Werkzeuggeschwindigkeiten die Flüssigkeiten (Wasser und Fließmittel) zu Beginn schneller im Mischgut verteilt und Partikelagglomerate durch die erhöhten Scherkräfte rascher zerstört werden.

4.3.3 Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Mischzeit

Die erforderliche Mischzeit (Zeit bis zum Erreichen der Stabilisationszeit) von UHPC wird neben der Werkzeuggeschwindigkeit hauptsächlich von der Betonzusammensetzung bestimmt [68].

Hierbei besitzt insbesondere der aktuelle und maximal mögliche Feststoffgehalt im Beton einen entscheidenden Einfluss auf die Mischzeit.

So führt ein zunehmendes Verhältnis zwischen dem Wasser- und Mehlkornvolumen $\left(\frac{V_W}{V_P}\right)$ zu einer deutlichen Reduktion der erforderlichen Mischleistung und zu einer Verkürzung der Stabilisationszeit.

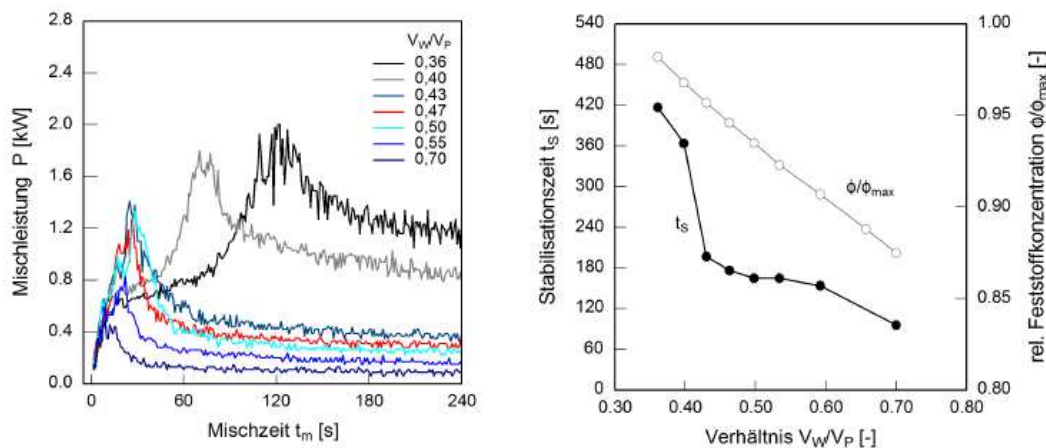


Abbildung 41 Veränderung der Mischleistungskurven in Abhängigkeit des Wasser-Mehlkornvolumen-Verhältnisses (links) sowie Reduktion der Stabilisationszeit in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen der aktuellen und der maximalen Feststoffkonzentration (rechts) [5]

Die Verkürzung der Stabilisationszeit t_s ist durch den erhöhten Wassergehalt und der damit verbundenen Zunahme der Wasserfilmdicke um die Partikel gegeben. Der damit einhergehende Abfall der intergranularen Reibung zwischen den Partikeln führt dazu, dass die Partikel eine erhöhte Beweglichkeit besitzen und für die Verteilung der Feststoffpartikel somit weniger Mischarbeit in das Mischgut eingebracht werden muss [68].

Das Wassermehlkornvolumen ist neben der Erhöhung des Wasseranteils auch durch das Verhältnis zwischen dem aktuellen Feststoffgehalt ϕ im Beton und dem maximal möglichen Feststoffgehalt ϕ_{max} (maximale Packungsdichte) beeinflussbar (siehe Abbildung 41 rechts). Während der aktuelle Feststoffgehalt anhand der Betonzusammensetzung berechnet werden kann, ist die maximale Packungsdichte entweder versuchs-technisch oder mit Hilfe von semiempirischen Modellen zu ermitteln [5].

Die maximale Packungsdichte stellt eine rein geometrische Größe dar und beschreibt den Anteil des Feststoffvolumens am Gesamtvolumen eines Partikelgemisches [5].

$$\phi_{max} = 1 - \left(\frac{\varepsilon}{100}\right)$$

ϕ_{max} ... maximale Packungsdichte

ε verbleibender Holraumgehalt

Der maximal mögliche Feststoffgehalt ϕ_{max} wird hierbei wesentlich von der Korngrößenverteilung und der Kornform beeinflusst [68].

Für ein polydisperses Partikelgemisch (unterschiedliche Partikelmerkmale wie Größe, Form, Dichte etc.) kann die maximale Packungsdichte nach HU und de LAARAD [71] anhand von folgender Formel semiempirisch ermittelt werden:

$$\phi_{max} = 1 - 0,45 \times \left(\frac{d_{min}}{d_{max}}\right)^{0,19}$$

d_{min} kleinster Partikeldurchmesser

d_{max} ... größter Partikeldurchmesser

Für UHPC liegt die maximale Packungsdichte ϕ_{max} im Bereich von rund 90 Vol-% [5].

Einerseits ist das Verhältnis (relativer Feststoffgehalt) zwischen dem aktuellen ϕ und dem maximal möglichen Feststoffgehalt ϕ_{max} durch den Wassergehalt beeinflussbar. So führt ein Anstieg des Wassergehalts bei unveränderter Zusammensetzung des Partikelgemisches (Zement, Mikrosilika, Quarzmehl und Grobzuschläge) zur einer Verringerung des aktuellen Feststoffgehalts im Beton. Die damit verbundene Abnahme des relativen Feststoffanteils hat zur Folge, dass den Partikeln im Gemisch mehr Wasser zu Verfügung steht, sich die Wasserfilmdicke um die einzelnen Partikel vergrößert und so die intergranulare Reibung zwischen den Partikeln reduziert wird [68]. Andererseits führt ein volumengleicher Austausch von größeren Partikeln (Zement und Quarzmehl) mit Feinstteilen (Silikastaub) dazu, dass der aktuelle Feststoffgehalt unverändert bleibt, der maximal mögliche Feststoffgehalt durch die kleineren Mikrosilikapartikel jedoch ansteigt. Die Vergrößerung des maximal möglichen Feststoffgehalts führt dazu, dass die feinen Silikapartikel als Füller dienen und somit das ansonsten in den Zwickeln eingeschlossene Wasser zur Erhöhung der Partikelbeweglichkeit zur Verfügung steht.

Nach MAZANEC sind die Hohlräume ab einem Silikastaubgehalt von 27,5 Vol.-% bezogen auf das Volumen des Mehlkorns, so weit gefüllt, dass eine weitere Erhöhung des Silikastaubgehalts zur Abnahme des maximal möglichen Feststoffgehalts führt. Die damit einhergehende Zunahme des relativen Feststoffanteils führt in weitere Folge zu einer Erhöhung der Stabilisationszeit [68].

Ebenso führt eine abnehmende Feinheit des Zements aufgrund der Verringerung des maximal möglichen Feststoffgehalts bei gleichzeitig unverändertem aktuellem Feststoffgehalt zum Ansteigen der Stabilisationszeit [5].

4.3.4 Einfluss des Fließmittels auf die Mischzeit

Neben dem Verhältnis des aktuellen zum maximal möglichen Feststoffgehalt ist die Mischzeit bzw. die Stabilisationszeit auch von der Fließmittelart abhängig [5].

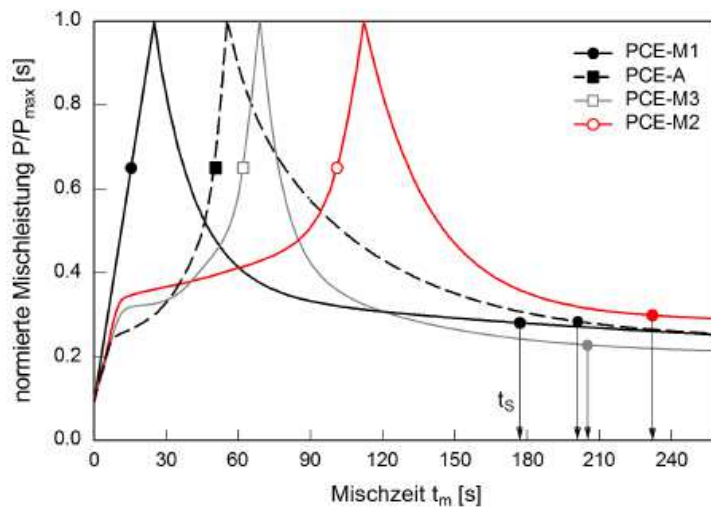


Abbildung 42 Einfluss unterschiedlicher PCE-Fließmittelarten auf die Stabilisationszeit [5]

Nach MAZANEC und SCHIESSL verfügen Fließmittel mit hoher anionischer Ladung, hoher molarer Masse sowie einer langen Hauptkette und vielen kurzen Seitenketten (siehe Abbildung 8) im Vergleich zu Fließmittelmolekülen mit geringer Ladungsdichte und wenigen langen Seitenketten über eine erhöhte und eine stärkere Adsorptionsneigung. Durch die höhere Adsorptionsneigung werden die Fließmittelmoleküle schneller und in größerer Zahl von den Bindemittelpartikeln adsorbiert. Dies führt zu einer raschen Verflüssigung des Gemisches und somit auch zu einer Verringerung der Mischzeit. Die rasche Adsorption des Fließmittels führt durch die fortschreitende Hydratation des Bindemittels jedoch zu einem frühen Verlust der Fließmittelwirksamkeit. Fließmittelmoleküle mit hoher Ladungsdichte sind im Vergleich zu Fließmittelmolekülen mit geringer Ladungsdichte daher weniger gut für konsistenzhaltende Maßnahmen geeignet. (Siehe Kapitel 2.1.4) [72], [20].

Durch die Variation der Mischungszusammensetzung (Verringerung des aktuellen Feststoffgehalts bzw. Steigerung des maximal möglichen Feststoffgehalts durch Optimierung der Partikelzusammensetzung) und der Fließmittelauswahl kann die Mischzeit von UHPC somit schon im Vorfeld beeinflusst bzw. reduziert werden [5].

4.3.5 Auswirkung einer zu langen Mischzeit

Wird über die optimale Mischzeit hinaus gemischt, führt dies nach Abbildung 37 zu einer Reduktion der Fließfähigkeit des Frischbetons (Phase drei).

Durch zu langes Mischen finden einerseits weitere Kollisionen der Partikel im Gemisch statt, was ferner zu einem Abrieb der Partikel führt. An-

dererseits werden durch die Übermischung die ersten Hydratphasen aufgebrochen, wodurch neue Reaktionsflächen entstehen [66].

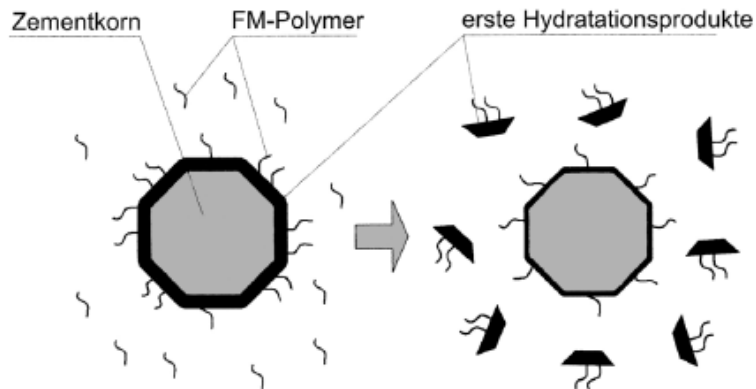


Abbildung 43 Entstehung von neuen Reaktionsflächen aufgrund des Abriebs der ersten Hydratphasen [5]

Beide Mechanismen führen zu einer Vergrößerung der Partikeloberflächen was folglich zu einer Erhöhung des Wasser- und Fließmittelanpruchs führt und sich in einer reduzierten Fließfähigkeit der Betonsuspension äußert [66]. Neben der Entstehung der zusätzlichen Partikeloberflächen wird die Fließfähigkeit der Betonsuspension auch von der Reaktivität des Zements bestimmt [5].

Des Weiteren erfolgt durch die Übermischung ein unnötiger Energieeintrag in das Mischgut, wodurch es zu einem überflüssigen Verschleiß der Mischerkomponenten und zu einer Erhöhung der Frischbetontemperatur kommt [58].

4.4 Prognosemodell zur Bestimmung der Stabilisationszeit

Anhand der in Kapitel 4.3 dargestellten Einflüsse auf die Stabilisationszeit ermittelte MAZANEC auf Basis von unterschiedlichen Mischleistungskurven ein Modell, womit die Mischzeit von UHPC prognostiziert werden kann. Das Modell basiert auf einem einstufigen Mischprozess, bei dem sich zu Beginn sämtliche Feststoffpartikel und Flüssigkeiten im Mischbehälter befinden.

Die Mischzeit ist nach Kapitel 4.3 eine Funktion der Werkzeuggeschwindigkeit (die Werkzeuggeschwindigkeit beeinflusst dabei die Flüssigkeitsverteilung und die Höhe der Scherkräfte, die in das Mischgut eingebracht werden) und der relativen Feststoffkonzentration $\left(\frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)$ des Partikelgemisches.

Hierbei führt eine Verringerung der relativen Feststoffkonzentration dazu, dass die Hohlräume im Gemisch durch feine Partikelkörnungen gefüllt sind und somit mehr Flüssigkeit zur Bildung von Gleitfilmen um die Partikel zur Verfügung steht. Die damit verbundene Reduktion der intergranularen Reibung führt zu einer höheren Beweglichkeit der Partikel im Gemisch und so zum früheren Erreichen der Stabilisationszeit. Darüber

hinaus ist für die Mischzeit, aufgrund der Adsorptionsgeschwindigkeit des Fließmittels durch die Feststoffpartikel, auch die Fließmittelart von Bedeutung. Zur Charakterisierung der Fließmittelart verwendet MAZANEC den hydrodynamischen Radius des Fließmittels. Dieser beschreibt die Fließmittelstruktur (Größe Anzahl und Ausrichtung der Haupt- und Seitenketten) der im Wasser verteilten Fließmittelpolymere. Eine Zunahme der anionischen Ladungsmenge und Abnahme des hydrodynamischen Radius führt zu einer rascheren Adsorptionsgeschwindigkeit und somit zu einer kürzeren Mischzeit [5].

Für eine näherungsweise Bestimmung der Stabilisationszeit gibt MAZANEC folgende Formel an [5]:

$$t_m \geq t_s = A \frac{v_u^{-0,116}}{\left(1 - B \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)} \times (0,237 \times R_h + 0,642)$$

t_m Mischzeit [s]

t_s Stabilisationszeit [s]

A Regressionskoeffizient

v_u Stabilisationszeit [m/s]

B Regressionskoeffizient

ϕ aktueller Feststoffgehalt [Vol.-%]

ϕ_{\max} ... maximale Packungsdichte [Vol.-%]

R_h hydrodynamischen Radius des Fließmittels [nm]

Die Regressionskoeffizienten werden von MAZANEC für A mit 18,92 und für B mit 0,97 angegeben. Der hydrodynamische Radius liegt je nach Fließmittelstruktur zwischen 1,5 (für Fließmittel mit hoher anionischer Ladung und vielen kurzen Seitenketten) und 3,0 (für Fließmittelmoleküle mit geringer Ladungsdichte und wenigen langen Seitenketten).

Mit dem oben dargestellten Prognosemodell können somit einerseits UHPC-Rezepturen im Hinblick auf ihre Mischzeit optimiert oder die notwendig Mischzeit in Abhängigkeit der Werkzeuggeschwindigkeit abgeschätzt werden [68].

4.5 Einfluss des Mischregimes auf die Mischzeit und die Mischqualität

Die Zugabereihenfolge der Betonausgangsstoffe insbesondere des Fließmittels hat einen entscheidenden Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften und auf die Mischzeit [9].

Die Vermischung der einzelnen Betonkomponenten erfolgt für gewöhnlich in verschiedenen Mischphasen mit unterschiedlichen Werkzeuggeschwindigkeiten.

Grundsätzlich kann für die Herstellung von UHPC zwischen zwei unterschiedlichen Mischregimen differenziert werden.

Eine Möglichkeit der Gestaltung des Mischablaufs ist es, in der ersten Phase sämtliche trockene Bestandteile (feine und grobe Gesteinskörnungen, Gesteinsmehle, Zement und pulverförmige Zusatzstoffe) im Mischbehälter trocken zu vermischen. Anschließend folgt in der zweiten Mischphase die Zugabe des Wassers und des Fließmittels.

Eine andere Möglichkeit den Mischablauf zu gestalten ist es, in der ersten Phase einen "Leim" aus Wasser, Fließmittel, Zement und den pulverförmigen Zusatzstoffen zu mischen und in einer zweiten Phase die Grobkornzuschläge zuzugeben [5].

Der Vorteil der getrennten Herstellung des Bindemittelleims und der späteren Zugabe der Zuschläge liegt einerseits in einem geringeren Energieverbrauch (niedrigere Widerstandskräfte aufgrund eines geringeren Füllungsgrades sowie frühere Reduktion der Widerstandskräfte durch raschere Verflüssigung) und andererseits in einem geringen Verschleiß der Mischwerkzeuge bzw. des Mischbehälters. Des Weiteren führt ein geteiltes Mischregime zu einem erhöhten Aufschluss des Fließmittels, wodurch die effektive Fließmittelmenge für eine vorgegebene Zielkonsistenz eines Betons reduziert werden kann [36].

Für eine möglichst rasche Verteilung der Flüssigkeiten (Wasser und Fließmittel) ist vor allem in der ersten Mischphase mit hohen Werkzeuggeschwindigkeiten zu mischen (siehe Kapitel 4.3).

Die Fließmittelzugabe kann in beiden Fällen auf unterschiedlicher Weise erfolgen.

Einerseits ist es möglich die gesamte Fließmittelmenge zusammen mit dem Anmachwasser dem trockenen Gemisch zuzugeben. Andererseits kann die Fließmittelmenge auch aufgeteilt werden, sodass zusammen mit dem Anmachwasser nur ein Teil der Fließmittelmenge den Feststoffpartikeln zugegeben wird. Der restliche Anteil des Fließmittels wird dem Mischgut dann erst nach einer angemessenen Mischzeit in einer weiteren Dosierphase zugegeben [9].

Untersuchungen von FLATT und HOUST zeigen, dass durch eine verzögerte Zugabe des Fließmittels (einige Minuten nach der Wasserzugabe) die Dispergierwirkung gesteigert werden kann [73]. Der Grund dafür liegt darin, dass die anfänglichen Hydratationsprodukte die unmittelbar nach dem Kontakt des Zements mit dem Anmachwasser entstehen, die Fließmittelmoleküle nicht sofort überwachsen. Nach CHANG und PENG kann die Mischzeit von UHPC bei gleichzeitiger Erhöhung der Druckfestigkeit um rund ein Drittel reduziert werden, wenn in der ersten Mischphase eine Bindemittelsuspension aus einem Teil des Anmachwassers und des Fließmittels hergestellt wird und dann in einer zweiten Mischphase die Grobzuschläge zusammen mit dem restlichen Wasser und Fließmittel zugegeben werden [74].

SCHACHINGER et al. gehen davon aus, dass die Dispergierwirkung des Fließmittels neben einer verzögerten Zugabe vor allem durch das Abhal-

ten einer Mischpause während des Mischprozesses verstärkt wird. Für die volle Leistungsfähigkeit des Fließmittels ist nach SCHACHINGER et al. eine zweiminütige Ruheperiode in der das Fließmittel mit dem Zement und dem Anmachwasser ausreichend in Kontakt treten kann erforderlich.

Die Zugabereihenfolge sowie der Verlauf der Leistungsaufnahme für den unterbrochenen Mischablauf nach SCHACHINGER et al. ist in Abbildung 44 dargestellt [75].

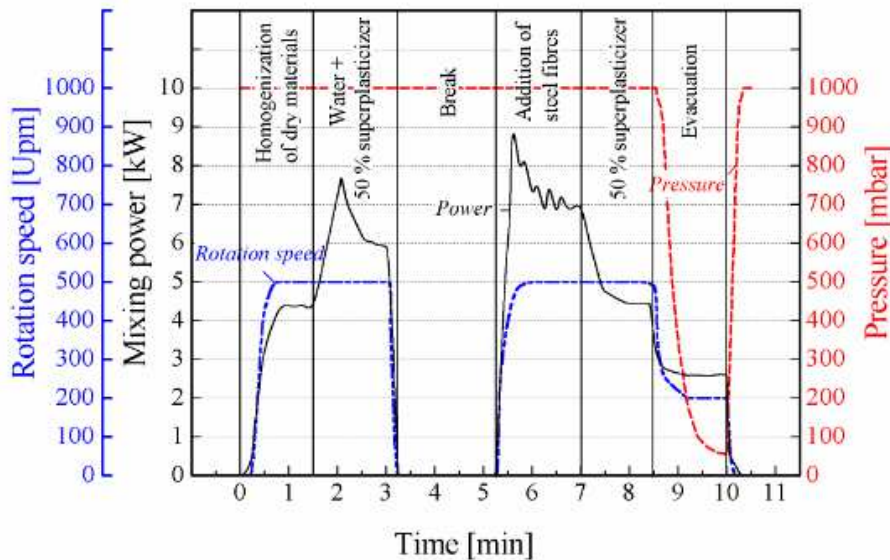


Abbildung 44 Zugabereihenfolge und Leistungsaufnahme für einen unterbrochenen Mischablauf [75]

Nach CAZACLIU et.al. hängt die Mischzeit bis zum Erreichen einer fließfähigen Suspension (Agglomeratdispersion) maßgeblich von der plastischen Viskosität (Maß für den Widerstand, den ein Baustoff beim Rühren, Streichen oder Verpumpen zeigt) des Betons ab. Eine Verkürzung der Mischzeit findet folglich mit einer abnehmenden plastischen Viskosität des Betons statt [64]. Umgelegt auf das Mischregime bedeutet dies, dass durch das Anmischen des Bindemittelleims in einer ersten Phase und die darauffolgende Zugabe der Zuschläge in einer zweiten Phase die Nassmischzeit im Vergleich zu einem Mischregime, bei dem sämtliche trockene Bestandteile von Beginn an mit Flüssigkeit beaufschlagt werden, aufgrund einer reduzierten plastischen Viskosität kürzer ausfällt.

Um die plastische Viskosität über den kompletten Mischablauf auf einem möglichst niedrigen Niveau zu halten und somit die Mischzeit weiter zu reduzieren, empfiehlt es sich nach Auffassung des Autors der vorliegenden Arbeit, sowohl beim Anmischen des Bindemittelleims als auch bei der nachfolgenden Zugabe der Zuschläge, die trockenen Bestandteile kontinuierlich in den Flüssigkeitsstrom des Mixers (Wasser + Fließmittel) bzw. in den Bindemittelleim einzumischen. Durch das kontinuierliche Einmischen der Feststoffe wird somit über den gesamten Mischablauf eine Suspension „aufrechterhalten“.

Werden nach dem Erreichen der Suspension Stahlfasern in das Gemisch eingebracht, führt dies zu einer deutlichen Zunahme der erforderlichen Mischzeit. Diese Mischzeitverlängerung ist damit begründet, dass

die Fasern nicht einfach in die Suspension eingeschüttet werden können (ungleichmäßige Faserverteilung mit punktuell erhöhter Faserkonzentration bzw. Igelbildung) sondern kontinuierlich in die Suspension einzuriegeln oder mittels Vibrationsrinnen zuzugeben sind. Zur Reduktion der Mischzeit sowie für eine gleichmäßige Verteilung empfiehlt es sich daher, die Fasern bereits direkt in die trockenen Komponenten einzumischen, wodurch es allerdings zu einem erhöhten Verschleiß der Mischertrommel und des Mischwerkzeugs kommt [5].

Aufgrund des für eine weitreichende Homogenisierung der Betonausgangsstoffe erforderlichen intensiven Mischprozesses von UHPC kommt es während des Mischens zu einem Einschlagen von Luftporen (Durchmesser: 0,1 - 1 mm) in den Frischbeton. Da diese Luftporen Störstellen in der Betonmatrix darstellen und somit die Druckfestigkeit und die Widerstandsfähigkeit des Festbetons reduzieren, gibt es Ansätze diese durch das Aufbringen eines Vakuums zu reduzieren und damit die Betoneigenschaften zu verbessern.

Nach MAZANEC und SCHACHINGER kann durch das Aufbringen eines Unterdrucks in einer letzten Mischphase (50 - 100 mbar für 30 - 60 s) der Luftporengehalt auf 0,3 - 0,8 Vol.-% reduziert werden, wodurch eine Steigerung der Druckfestigkeit von rund 40% erreicht werden kann [5].

Neben der Zunahme der Druckfestigkeit führt die Reduktion der Luftporen auch zu einer Reduktion der Fließgrenze und somit zu einer Erhöhung der Fließfähigkeit, womit eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons erreicht wird [76].

KIRNBAUER konnte eine Steigerung der Druckfestigkeit in solch hohem Maße jedoch nicht bestätigen [77].

5 Durchführung von Mischversuchen

Im folgenden Abschnitt werden nun zum einen die für die Durchführung der Mischversuche verwendeten Mischertypen und das mögliche Einsparungspotenzial der Nassmischzeit durch die Vorfertigung von Fein- und Grobkorn-Premixes dargestellt. Zum anderen werden die durchgeführten Mischversuche und die erreichten Mischergebnisse anhand der ermittelten Frisch- und Festbetonkennwerte aufgezeigt.

Für das Versuchsprogramm wurden hierzu zwei UHPC-Betonrezepturen mit unterschiedlichen Konsistenzklassen (selbstverdichtender Beton und Rüttelbeton der Konsistenzklasse F 45) ausgewählt.

Der Mischablauf wurde analog zum derzeit an der Technischen Universität Graz angewendeten Mischprozess (Herstellen einer Bindemittelsuspension mit anschließendem Einmischen der Grobkornfraktion) gestaltet.

5.1 Motivation und Ziel der Mischversuche

Wie bereits in der Einleitung erläutert, soll mithilfe der durchgeführten Mischversuche einerseits ein Mischertyp und andererseits ein Mischablauf gefunden werden, womit für zukünftige UHPC-Großprojekte eine qualitativ hochwertige Betonproduktion innerhalb einer möglichst geringen Mischzeit erreicht werden kann.

Des Weiteren sollen die Mischversuche auch dazu beitragen einen für die Anforderungen der Technischen Universität Graz geeigneten Mischer zu finden. Da die Herstellung von Probekörpern für Großversuche an der Technischen Universität Graz bisher nur mittels Mischern mit einer maximalen Füllmenge von 100 Litern erfolgte, mussten für die erforderliche Frischbetonmenge mehrere Chargen mit unterschiedlichen Mixern erzeugt werden. Dies führte sowohl zu einem erhöhten Arbeitsaufwand als auch bedingt durch die unterschiedliche Arbeitsweise der beiden derzeitigen verwendeten Mischer, der zunehmenden Erwärmung des Mischbehälters sowie durch etwaige Fehler in der Zugabe oder der Bedienung, zur Gefahr der Entstehung von Qualitätsunterschieden zwischen den einzelnen Frischbetonchargen.

Zudem dienen die Versuche auch dazu, Erfahrungen an modernen derzeit am Markt befindlichen Betonmischern zu sammeln. Um einen mischzeitoptimierten Fertigungsprozess zu simulieren, wurde zudem die Auswirkung einer Vollerfüllung der Mischbehälter auf die Mischzeit sowie auf das Mischergebnis (Frisch- und Festbetoneigenschaften) untersucht.

Die Mischversuche sollten darüber hinaus weiter dazu dienen, den Einfluss der Bindemittelsuspension auf die Betoneigenschaften zu ermitteln und jenen Mischertypen zu finden, mit dem Bindemittelsuspensionen in hoher Qualität (Suspension mit geringer Fließgrenze und frei von Partikelzusammenschlüssen) und in möglichst kurzer Mischzeit hergestellt werden können.

Während der Mischtests kamen vier unterschiedliche Betonmischertypen sowie zwei spezielle Suspensionsmischer zum Einsatz. Das Fassungsvermögen der Mischer belief sich zwischen 5 - 500 Liter Frischbeton bzw. 3 - 50 Liter Bindemittelsuspension.

5.2 Mischzeiteinsparung durch die Erzeugung von Pre-mixes

Die Dauer für die Herstellung einer Frischbetoncharge ergibt sich aus der Spielzeit des Mixers. Als Spielzeit wird dabei „[...] die Zeit zwischen dem Beginn zweier unmittelbar aufeinanderfolgender Einfüllvorgänge [...]“ [78] verstanden. Die Spielzeit t_s für ein Arbeitsspiel des Mixers setzt sich demnach wie folgt zusammen:

$$t_s = t_f + t_M + t_L + t_R$$

t_s Spielzeit

t_f Einfüllzeit

t_M Mischzeit

t_L Entleerungszeit

t_R Rückstellzeit

Um bereits im Vorfeld eine, unabhängig vom gewählten Mischertyp effiziente Einsparung der Mischzeit t_M zu erreichen, wurden für die vorliegenden Versuche an den 500 Liter Mixern die trockenen Betonausgangsstoffe, aufgeteilt in eine Grob- und Feinkornfraktion in stationären Mischanlagen vorgemischt und in separaten Big-Bags bis zum Nassmischen zwischengelagert. Das Funktionsschema einer stationären Pre-mix-Trockenmischanlage sowie die Big-Bag-Zusammensetzungen sind in Abbildung 45 dargestellt.

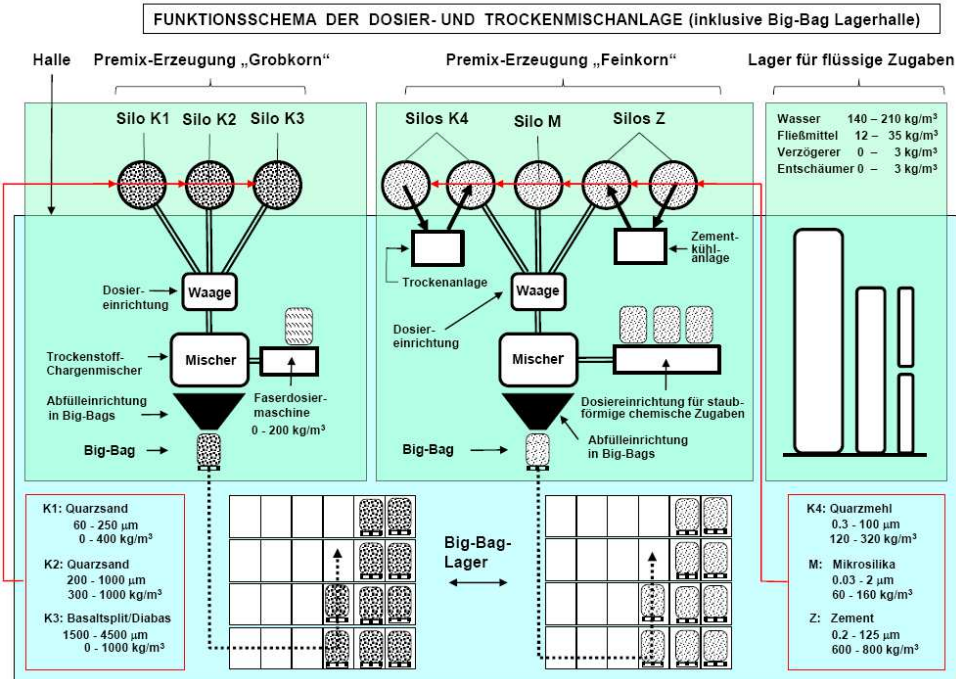


Abbildung 45 Konzept der Trockenmischanlage [nach Sparowitz L.]

Aus Abbildung 45 ist zu entnehmen, dass einerseits die Feststoffpartikel für den Bindemittelleim (Zement, Quarzmehl und Mikrosilika) und andererseits die größeren Partikelzuschläge (unterschiedlich feine Quarzsande und Basaltsplit/Diabas) sowie die Stahlfasern jeweils eine Big-Bag-Fraktion bilden.

Zusammen mit den Flüssigkeiten (Anmachwasser und Zusatzmittel) ergeben somit ein „Bindemittel-Feinkorn-Big-Bag“ und ein „Grobkorn-Big-Bag“ beim Nassmischen eine Betoncharge.

Für die vorliegenden Mischversuche wurde die Zusammensetzung der Partikel-Big-Bags so gewählt, dass eine Frischbetonmenge von 500 Litern gemischt werden kann.

Während die Zusammensetzung der „Bindemittel-Feinkorn-Big-Bags“ sowohl für die SCC- als auch für die F 45-Rüttelbeton-Rezeptur dasselbe Zement-/Quarzmehl-/Mikrosilika-Mischungsverhältnis aufwies, wurden bei den „Grobkorn-Big-Bags unterschiedliche Zusammensetzungen für die SCC- und die F45-Rezeptur gewählt.

Die Zusammensetzung der einzelnen Big-Bag-Typen gliederte sich wie folgt:

„Bindemittel-Feinkorn-Big Bag“:

- Zement
- Mikrosilika
- Quarzmehl

„Grobkorn-Big-Bag“ für die SCC-Rezeptur:

- Quarzsand-Typ 1

- Quarzsand-Typ 2
- Stahlfasern

„Grobkorn-Big-Bag“ für die F 45-Rezeptur:

- Quarzsand-Typ 1
- Quarzsand-Typ 2
- Diabas 2-4 mm
- Stahlfasern

Die Partikeleigenschaften der verwendeten Betonausgangsstoffe sind in Tabelle 3 dargestellt.

Lfd.Nr.	Stoffbezeichnung	Partikelgröße [μm]	Blaine-Wert [cm^2/g]	Kornroh- dichte [g/cm^3]
[A]	[B]	[C]	[D]	[E]
1	Zement	10-40	3800	3,17
2	Mikrosilika	0,10-0,30	160000-200000	2,25
3	Quarzmehl	0-40	16900	2,65
4	Quarzsand-Typ 1	100-200	k.A.	2,65
5	Quarzsand-Typ 2	300-800	k.A.	2,65
6	Diabas	2000-4000	k.A.	3,05

Tabelle 3 Partikeleigenschaften der Betonausgangsstoffe

5.3 Untersuchte Mischertypen

Im vorliegenden Versuchsaufbau werden für die Herstellung von UHPC vier unterschiedliche Mischertypen von verschiedenen Mischerherstellern hinsichtlich ihrer Mischzeit und der Mischqualität untersucht.

Bei den zu testenden Mischertypen handelt es sich um folgende Modelle:

5.3.1 Skako Rotoconix

Der Skako Rotoconix-Mischer besteht aus einem kegelförmigen rotierenden Mischbehälter (Trog), zwei stationären Wandabstreifern (Trog-schaufeln) und aus zwei unterschiedlichen exzentrisch angeordneten Mischwerkzeugen [79].

Als Mischwerkzeuge verwendet der Skako Rotoconix gleichzeitig einen Hochgeschwindigkeitswirbler und eine Zwei-Wege-Schnecke (siehe Abbildung 46).



Abbildung 46 Mischwerkzeuge des Skako Rotoconix

Der Hochgeschwindigkeitswirbler dient dazu, die im Mischgut befindlichen Agglomerate aufzubrechen. Der Wirbler kann hierzu mit einer Geschwindigkeitsbreite von 75 - 300 U/min bedient werden [79].

Mit Hilfe der Zwei-Wege-Schnecke (Geschwindigkeitsbreite 25 - 100 U/min) wird eine senkrechte Bewegung des Mischguts erzeugt, wodurch eine verbesserte Homogenisierung der Betonausgangsstoffe erreicht wird [80].

Beide Mischwerkzeuge sind sowohl gegen als auch im Uhrzeigersinn drehend bedienbar. Ebenso sind die Drehzahl der Mischwerkzeuge und des Mischbehälters individuell regelbar [80].

Der kegelförmige Mischbehälter (Geschwindigkeitsbreite der Trogrotation 4 - 16 U/min) und die Zwei-Wege-Schnecke ermöglichen eine flexiblere Betonproduktion, da Chargen von 10 bis 100% vom maximalen Füllvermögen des Troges hergestellt werden können [79]. Ebenso verhilft die Kegelform zu einer schnellen und rückstandsfreien Entleerung des Mischguts an der Trogunterseite, wodurch infolge von kürzeren Zyklusdauern Kapazitätsgewinne entstehen [80].

Der Skako Rotoconix-Mischer sowie ein Schnitt durch den Mischer sind in Abbildung 47 dargestellt.

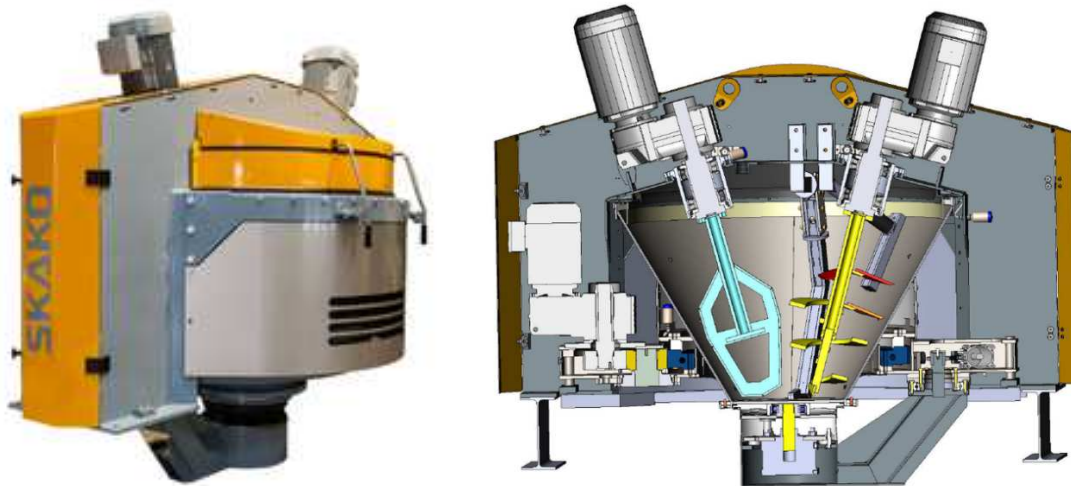


Abbildung 47 Skako Rotoconix (links) bzw. Schnitt durch den Mischer (rechts) [79]

Durch die Rotation des Mischbehälters erfolgt beim Skako Rotoconix im Vergleich zu Mischersystemen bei dem der Mischbehälter still steht, eine Entkoppelung des Materialtransports vom eigentlichen Mischvorgang. Anders als bei einem Planetenmischer, bei dem das Mischgut durch die Mischwerkzeuge im Behälter vor sich hergeschoben und so im Mischbehälter verteilt wird, wird beim Skako Rotoconix durch die Rotation des Troges in Kombination mit den stationären Wandabstreifern das gesamte Mischgut den Mischwerkzeugen direkt zugeführt.

Beim Mischprozess selbst erzeugt der Hochgeschwindigkeitswirbler hohe Scherkräfte die im Mischgut zu einer Feinvermischung (dispersives Mischen bzw. Micromixing) führen. Die vertikale Förderung bzw. Umwälzung des Mischguts erfolgt einerseits über die entstehenden Fliehkräfte im Mischgut und andererseits durch die Zwei-Wege-Schnecke, die das Mischgut ständig vom Behälterboden über die gesamte Troghöhe zur Behälteroberfläche transportiert und so für eine Grobvermischung (konvektives Mischen bzw. Makromixing) sorgt. Über die Schwerkraft und die stationären Wandabstreifer wird das Mischgut in einer Abwärtsbewegung zum Behälterboden wiederum dem Hochgeschwindigkeitswirbler und der Zwei-Wege-Schnecke zugeführt, wodurch ebenfalls eine Grobvermischung des Mischgutes erfolgt (siehe Abbildung 48) [61].

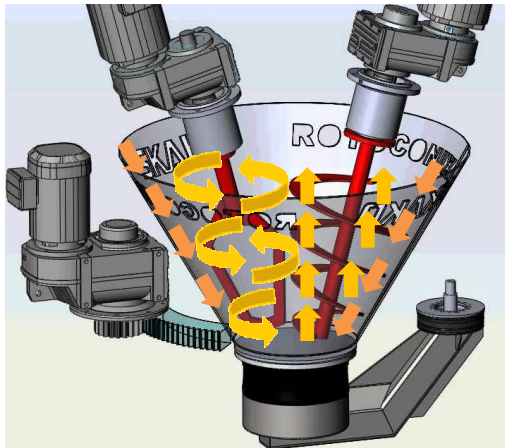


Abbildung 48 Strömungsverlauf im Skako Rotoconix (in Anlehnung an [81])

Die Rotation des Mischbehälters sorgt dafür, dass zwischen dem Mischgut und dem Behälter kein bzw. nur ein minimaler Geschwindigkeitsunterschied vorliegt und es somit nur zu geringfügigen und konstanten Reibungskräften im Bereich des Boden-Wandabstreifers kommt. Durch diese geringen Reibungskräfte wird der Materialverschleiß an der Behälterwand des Skako Rotconix gegenüber Mischsystemen mit ruhenden Mischtrommeln deutlich reduziert.

Für den Hochgeschwindigkeitswirbler sind beim Skako Rotoconix in Abhängigkeit der Mischanforderungen zwei unterschiedliche Bauvarianten verfügbar.



Abbildung 49 Varianten des Hochgeschwindigkeitswirblers beim Skako Rotoconix (links Variante A: Standardwirbler - rechts Variante B: Spezialwirbler)

Variante A stellt hierbei das Standardwerkzeug des Rotoconix dar. Der Einsatzbereich dieses Werkzeugs liegt hauptsächlich in der Herstellung von Normalbetonrezepturen oder auch UHPC-Mischungen ohne Faserbewehrung.

Da die Mischung von hochkohäsiven Betonrezepturen mit dem Standardwirbler aufgrund der hohen Mischgeschwindigkeiten bzw. Mischenergien und dem geringen Abstand der "Wirblerschneide" zur Trogwand zur Entstehung von unerwünschten Vibrationen führen, wird für die

Mischung von faserbewehrten UHPC-Rezepturen vom Hersteller die Verwendung des Hochgeschwindigkeitswirblers der Variante B empfohlen.

Durch die Auflösung des Wirblerquerschnitts und die Verdrehung des unteren Teils des Wirblerblattes um 90° können die lateral auf die Trogwand wirkenden Kräfte um rund 50 % reduziert werden und somit die Entstehung von Vibrationen am Mischtrog verhindert werden.

5.3.2 Kniele Konusmischer

Der Kniele Konusmischer (KKM) verfügt ebenso wie der Skako Rotocox-Mischer über einen kegelförmigen Mischbehälter. Im Vergleich zum Skako Roconix ist der Trog des Kniele Konusmischer jedoch nicht rotierbar, wodurch Reibungskräfte auf die Behälterwände wirken und diese daher mit Keramikplatten ausgekleidet sind.



Abbildung 50 Kniele Konusmischer [82] (links) und Blick in den Mischertrog (rechts)

Anders als beim Skako Rotoconix verfügt der KKM lediglich über ein Mischwerkzeug welches zentrisch angeordnet ist. Das Standardrührwerkzeug des KKM besteht zur einen Hälfte aus einer schneckenförmigen Wendel und zu anderen Hälfte aus versetzt angeordneten Mischflügeln bzw. Mischpaddel (siehe Abbildung 51).

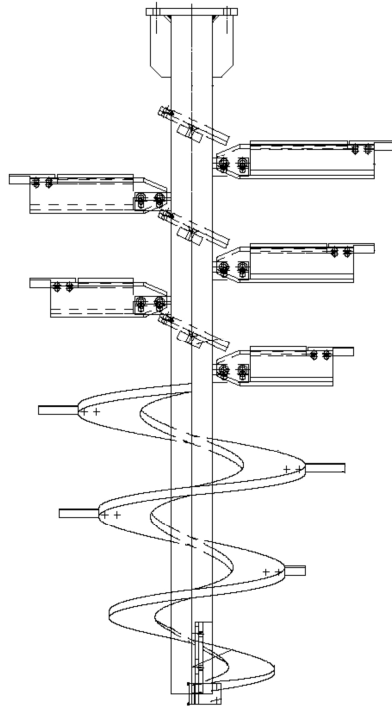


Abbildung 51 Inneres Rührwerkzeug des KKM-Konusmischer [83]

An den Behälterwänden sind in unterschiedlicher Höhe Abstreifer (je nach Mischgröße in Umfangsrichtung zwischen 90° - 120° versetzt) angeordnet, die sowohl in die gleiche als auch in die entgegengesetzte Rotationsrichtung der vertikalen Mischwelle geführt werden können [84].

Durch die Ausbildung des Mischwerkzeugs als Schnecke, erfährt das Mischgut primär eine vertikale Förderung nach oben. Die im oberen Bereich angeordneten Mischpaddel sorgen anschließend für den Transport des Mischguts zu den Behälterwänden (das Mischgut erfährt hierbei eine Rotationsbewegung nach außen). Durch das äußere Rührarm-Rührwerk (Abstreifer) welches der Rotationsbewegung des Mischguts entgegenarbeitet, kommt es zur Ausbildung von entgegengesetzten, vertikal und quer zueinander laufenden Mischgutströmen, die für die Durchwirbelung des gesamten Mischgutes sorgt. Unter der Einwirkung der Schwerkraft und mit Hilfe der Randabstreifer wird das Mischgut wiederum nach unten zum Behälterboden bzw. zur Schnecke gefördert [85].

Eine Scherung des Mischgutes erfolgt hauptsächlich durch die an der Außenseite der Schnecke und der Paddel angeordneten Messer bzw. im oberen Bereich des Mischwerkzeugs durch die Paddel selbst.

Die Strömungsverläufe im KKM sind in Abbildung 52 dargestellt:

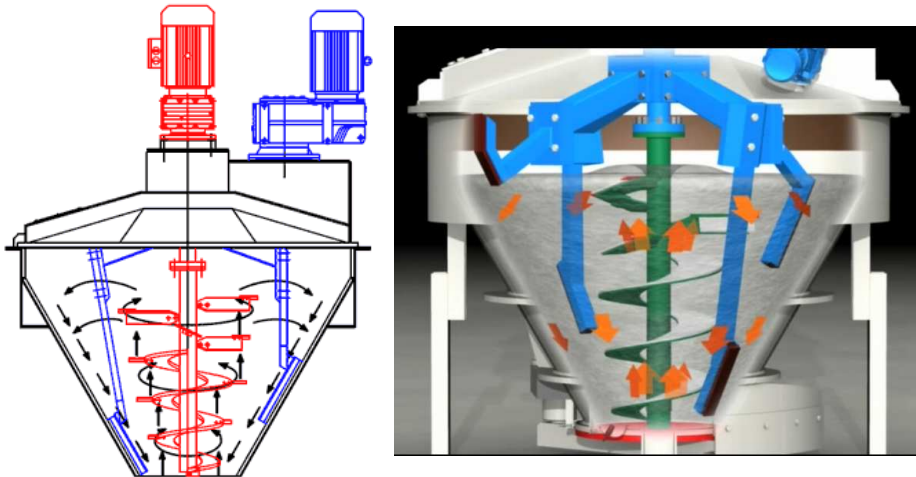


Abbildung 52 Strömungsverläufe im Kniele-Konusmischer [86]

Aufgrund zweier separater Motoren können die Drehzahlen des Mischwerkzeugs und die der Abstreifer individuell und stufenlos gesteuert werden [84].

5.3.3 MAT Gegenstrom-Intensivmischer-GIM 50

Anders als bei den beiden obigen Mischersystemen handelt es sich beim MAT Gegenstrom-Intensivmischer um einen reinen Suspensionsmischer zur Herstellung von Bindemittelleimen, Mörtel, Feinkornbetonen und Bentonitsuspensionen.

Der Mischer ist dadurch gekennzeichnet, dass der Mischraum in zwei übereinander angeordneten Mischzonen (u-förmige Mischtröge) mit unterschiedlichen Funktionen und unterschiedlichem Nutzvolumen aufgeteilt ist.

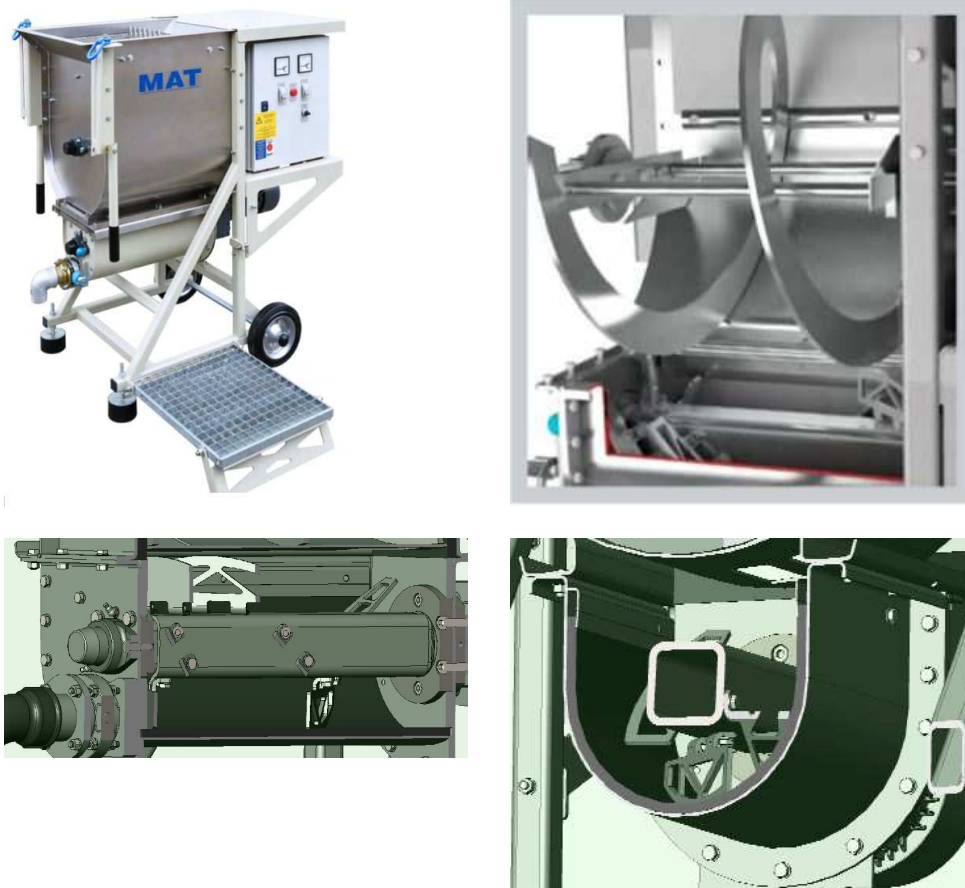


Abbildung 53 MAT Gegenstrom-Intensivmischer-GIM 50 (links oben) und eine Detailaufnahme des Mischwerks (rechts oben) - Längsschnitt (links unten) und Querschnitt (rechts unten) durch die Intensivmischzone [87]

Im Übergang zwischen dem oberen und dem unteren Mischtrog ist ein Trennblech, das den Boden der Vormischzone bzw. den oben Abschluss der Intensivmischzone entspricht angeordnet. Dieses Trennblech welches die Vormischzone (oberer Trog) und die Intensivmischzone (unterer Trog) räumlich voneinander trennt, verfügt am Anfang und am Ende des Mischtrogs über jeweils eine Durchlassöffnung, wodurch die Suspension von der Intensivmischzone in die Vormischzone und umgekehrt gefördert wird.

In der Vormischzone erfolgt die Grobverteilung (konvektives Mischen bzw. Makromixing) und die Homogenisierung aller Mischgutkomponenten. In der darunter befindlichen Intensivmischzone findet aufgrund der hohen Werkzeuggeschwindigkeiten die Feinverteilung (dispersives Mischen bzw. Micromixing) sowie der kolloidale Aufschluss sämtlicher Partikel statt.

In den beiden Mischzonen sind unterschiedliche Mischwerkzeuge eingebaut, deren Funktion darin besteht, neben der Homogenisierung (Vormischzone) und dem kolloidalen Aufschluss (Intensivmischzone) auch einen ständigen, zirkulierenden Transport / Austausch des Mischgutes zwischen den beiden Zonen zu gewährleisten.

Das Mischprinzip bzw. der Materialströmungsverlauf des MAT-Gegenstrom-Intensivmischers ist in Abbildung 54 dargestellt.

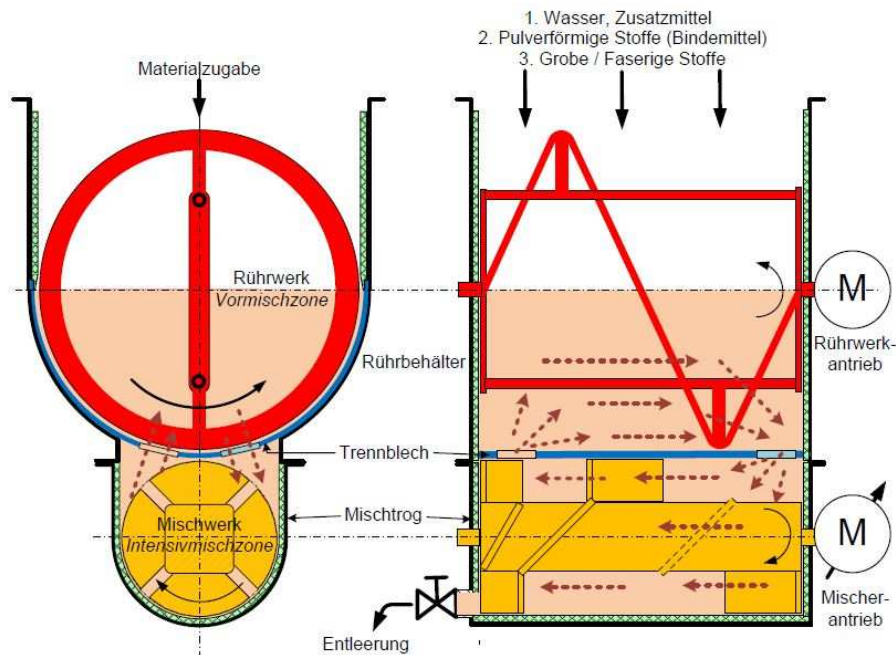


Abbildung 54 Mischprinzip des MAT – Gegenstrom – Intensivmischers

Die Mischwerkzeuge in der Intensivmischzone sind als perforierte Pad-del ausgeführt.

Während das Rührwerk in der Vormischzone in der Regel mit konstanter Drehzahl ($\sim 1 - 1,5$ m/s bzw. 83 - 125 U/min) betrieben wird, ist die Drehzahl des Mischwellenantriebes der Intensivmischzone mittels Proportionalregelung in Abhängigkeit der installierten Antriebsleistung und der erforderlichen Scherrate einstellbar ($\sim 2 - 8,0$ m/s bzw. 175 - 700 U/min).

Da die Wirkungsweise des MAT-Gegenstrom-Intensivmischers darauf beruht, dass sich zwischen der oberen Vormischzone und der unteren Intensivmischzone ein Flüssigkeitsstrom ausbildet der sämtliche Feststoffpartikel im Mischraum dispergiert und in Schwebelage hält, sieht der Prozessablauf vor, dass immer zuerst 80 - 100 % der flüssigen Mischungsbestandteile und anschließend die pulverförmigen Bindemittel und/oder Zusatzmittel/Zusatzstoffe in den Mischer dosiert werden.

Bei hoher Drehzahl wird im Gegenstrom-Intensiv-Mischer aus der flüssigen Phase und den pulverförmigen Stoffen in kürzester Zeit ein kolloidal aufgeschlossener „Bindemittelleim“ aufbereitet.

Unmittelbar anschließend wird die Mischerdrehzahl reduziert und die weiteren, groben und/oder faserigen Bestandteile in den Mischer dosiert. Dabei werden die Grobstoffe schonend in die Bindemittelsuspension eingerührt und zu einer homogenen Fertigmischung verarbeitet.

Während der Entleerung des Mixers kann die Mischerdrehzahl zur schnelleren Entleerung dann wieder sukzessive erhöht werden.

5.3.4 Eirich-Intensivmischer

Der Eirich Intensivmischer besteht aus einem drehenden Mischbehälter, dem rotierenden Mischwerkzeug (Wirbler) und einem stationären Kombiwerkzeug zur Umlenkung des Massenstroms und zur Wandabschabung (Boden-Wandabstreifer) [49].

Durch die Rotation des Mischbehälters erfolgt wie beim Skako Rotoconix eine Entkoppelung des Materialtransports vom eigentlichen Mischvorgang. Dadurch kommt es nur zu geringfügigen und konstanten Reibungskräften im Bereich des Boden-Wandabstreifers [11].

Beim Mischprozess selbst führen die durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit des Mischwerkzeuges und des drehenden Mischbehälters entstehenden Fliehkräfte dazu, dass das Mischgut entlang der Behälterwand nach oben gefördert wird. Bedingt durch die Schwerkraft fällt das Mischgut im Anschluss wieder nach unten, wodurch es zu einer Grobvermischung des Mischgutes kommt. Diese wird zusätzlich durch den Boden-Wandabstreifer, der das Mischgut dem Mischwerkzeug zuführt, unterstützt [61].

Die Feinvermischung der Betonausgangsstoffe erfolgt mit Hilfe des Wirblers, der durch seine hohe Werkzeuggeschwindigkeit Materialströme mit einer hohen Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Mischgut und dem Mischwerkzeug erzeugt [61].

Das Mischprinzip des Eirich Intensivmischers wird in Abbildung 55 dargestellt:

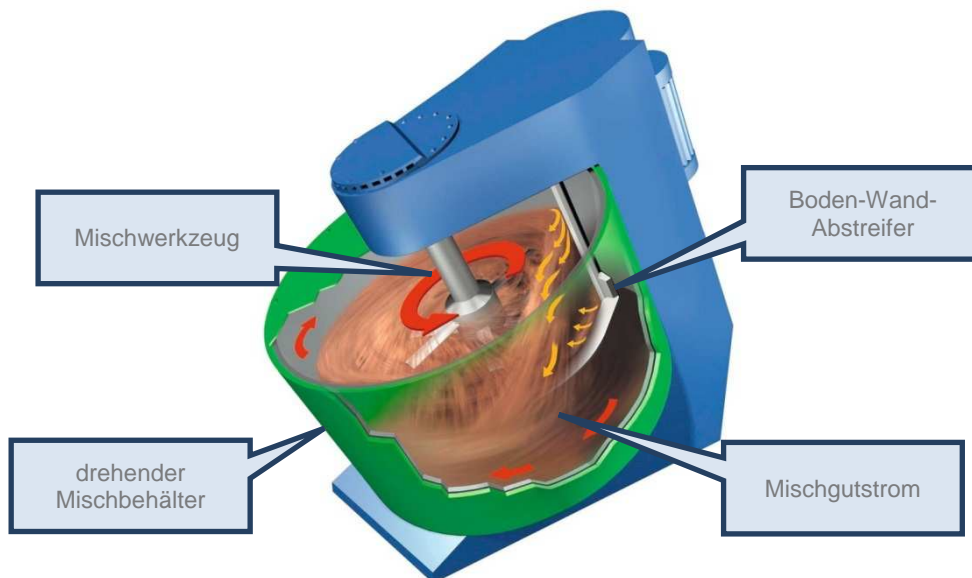


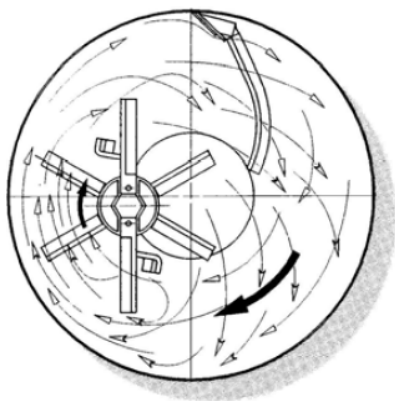
Abbildung 55 Mischprinzip des Eirich Intensivmischers in Anlehnung an [11]

Für die Betonherstellung können im Eirich Intensivmischer als Mischwerkzeug ein Stern- oder ein Stiftenwirbler verwendet werden (siehe Abbildung 56). Die Drehrichtung des Mischwerkzeugs kann sowohl in Richtung der Behälterrotation als auch gegen die Behälterrotation erfolgen [11]. Die Werkzeuggeschwindigkeit ist beim Eirich Intensivmischer stufenlos von 1m/s - 40 m/s bzw. 50 - 1900 U/min regelbar [88].

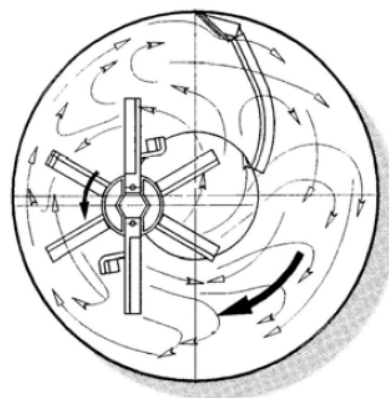


Abbildung 56 Sternwirbler (links) und Stiftenwirbler (rechts) [61]

Durch die exzentrische Anordnung des Mischwerkzeuges wird das Mischgut entlang von Schlaufenbahnen, die den gesamten Querschnitt des Behälterbodens überstreichen, transportiert [28]. Ein Maximum an Scherkräften wird hierbei beim Querstromprinzip (Wirbler und Mischbehälter drehen in die gleiche Richtung) in das Mischgut eingebracht [89].



*Strömungsbild
Querstromprinzip*



*Strömungsbild
Gegenstromprinzip*

Abbildung 57 Strömungsbild eines Eirich Intensivmischers [11]

Die Kombination zwischen dem rotierenden Mischbehälter, dem unabhängig arbeitenden Mischwerkzeug und einem stationären Bodenwandabstreifer ermöglicht eine 100%ige Umwälzung des Mischguts pro Umdrehung des Mischbehälters [88]. Die Schrägstellung des Behälters fördert zusätzlich das Entstehen höherer Wurfkräfte im Mischgut [11].

5.4 Beurteilung der Mischqualität bzw. der Mischwirkung

Zur Bewertung der Mischqualität bzw. der Mischwirkung der getesteten Mischertypen werden für die vorliegenden Mischversuche die Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfung herangezogen.

5.4.1 Frischbetonprüfungen

Die Frischbetoneigenschaften werden hierbei nach den Frischbetonprüfungen der ÖNORM EN 12350 1-12 bzw. nach der DIN 1015-3 bestimmt.

5.4.1.1 Prüfung von Frischbeton-Setzfließversuch

Anhand des Setzfließmaßes erfolgt die Beurteilung der Fließfähigkeit und der Ausbreitgeschwindigkeit von selbstverdichtendem Beton. Der Frischbeton wird hierzu ohne zusätzliche Verdichtungsenergie in eine auf einer ebenen Stahlplatte positionierten Kegelform nach der ÖNORM EN 12350-2 geschüttet. Anschließend wird der Kegel in einer Bewegung nach oben abgehoben „[...] und die Zeit zwischen dem Beginn der Aufwärtsbewegung der Kegelform und dem Erreichen des Ausbreitdurchmessers von 500 mm [...]“ [90] (t_{500}) bestimmt. „Das Setzfließmaß wird als Mittelwert aus dem größten Ausbreitdurchmesser und dem rechtwinklig dazu gemessenen Ausbreitdurchmesser bestimmt.“[90]

Das Setzfließmaß (SF) wird anhand der nachfolgenden Formel ermittelt:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

SF Setzfließmaß, in mm

d_1 der größte Ausbreitdurchmesser, in mm

d_2 der rechtwinklig zu d_1 gemessene Ausbreitdurchmesser, in mm

5.4.1.2 Prüfung von Frischbeton-Setzfließversuch-Hägermann

Neben der in Kapitel 5.4.1.1 beschriebenen Prüfung des Setzfließmaßes wurde für die Prüfung der Fließfähigkeit der SCC-Rezeptur ebenso die Fließfähigkeit mittels Hägermanntrichter nach DIN 1015-3 ermittelt.

Für die Bestimmung der Fließfähigkeit ist der Frischbeton hierzu ohne zusätzliche Verdichtung in den, auf einer sauberen und glatten Oberfläche stehenden, Hägermanntrichter bis zum Rand zu füllen. Anschließend ist der Konus von der Oberfläche abzuheben, sodass der Beton unter Einwirkung der Schwerkraft aus dem Trichter fließt. Das Setzfließmaß des Ausbreitkuchens ist durch das Messen zweier aufeinander normal stehenden Durchmesser zu ermitteln (analog zum Verfahren aus Kapitel 5.4.1.1) [91].

5.4.1.3 Prüfung von Frischbeton-Ausbreitmaß

Anhand des Ausbreitmaßes erfolgt die Beurteilung der Konsistenz von-Rüttelbeton. Der Frischbeton wird hierzu in zwei gleichen Lagen, wobei jede Lage mit zehn leichten Stößen mittels Stößel zu verdichten ist, in einen auf dem Ausbreittisch positioniertem Kegelstumpf nach der ÖNORM EN 12350-5 eingebracht [92].

Anschließend ist der Kegelstumpf nach oben hochzuziehen und die Tischplatte des Ausbreittisches 15-mal bis zum Anschlag (Hubhöhe 40 mm) anzuheben und wieder frei fallen zu lassen. Das Ausbreitmaß des Frischbetons wird als Mittelwert zwischen den beiden Höchstausbreitmaßen des Betons parallel zu den Tischkanten ermittelt [92].

Das Ausbreitmaß f wird anhand der nachfolgenden Formel ermittelt:

$$f = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

f Ausbreitmaß in mm

d_1 die größte Ausbreitung des Betons parallel zu einer Kante des Ausbreittisches, in mm

d_2 die größte Ausbreitung des Betons parallel zu einer Kante des Ausbreittisches, in mm

5.4.1.4 Prüfung der Frischbetonrohddichte

Für die Ermittlung der Frischbetonrohddichte ist ein wasserdichter Behälter mit ausreichender Biegesteifigkeit leer zu wiegen und der abgelesene Wert aufzuzeichnen (m_1). Anschließend ist der Behälter in zwei oder mehr Lagen (abhängig von der Konsistenz) bzw. in einem Arbeitsgang (bei selbstverdichtendem Beton) mit Frischbeton bis zum Behälterrand zu füllen und im Falle von Rüttelbeton zu verdichten. Für die Bestimmung der Masse des gefüllten Behälters ist dieser neuerlich zu wiegen und der abgelesene Wert (m_2) aufzuzeichnen [93].

Die Berechnung der Frischbetonrohddichte erfolgt nach folgender Formel:

$$D = \frac{m_2 + m_1}{V}$$

D Frischbetonrohddichte, in kg/m^3

m_1 Masse des leeren Behälters, in kg

m_2 Masse des vollständig mit verdichtendem Beton gefüllten Behälters, in kg

V Volumen des Behälters, in m^3

5.4.1.5 Prüfung des Frischbetonluftgehalts

Für die Ermittlung des Luftgehalts einer Frischbetonprobe ist der Druckbehälter des Druckmessgeräts vollständig mit Frischbeton zu füllen. Bei

der Prüfung von Rüttelbeton ist dieser anschließend mittels Rütteltisch, Innenrüttler oder Stampfer zu verdichten. Bei selbstverdichtendem Beton darf keine zusätzliche Verdichtung erfolgen. Anschließend ist die Betonoberfläche am oberen Rand des Behälters zu glätten, das Verschlussaggregat aufzusetzen und mittels Klemmvorrichtung zu fixieren. Über eines der beiden Seitenventile ist so lange Wasser einzufüllen, bis es aus dem zweiten Seitenventil austritt. Das Entlüftungsventil der Luftpumpe ist zu schließen und mittels Pumpe so lange Luft in die Kammer zu pumpen bis die Nullpunktanzeige des Manometers erreicht wird. Anschließend sind die Seitenventile zu schließen, das Hauptluftventil zu öffnen und der prozentuale Luftgehalt der Frischbetonprobe am Manometer abzulesen [63].

5.4.2 Prüfung der Festbetoneigenschaften

Die Ermittlung der Festbetoneigenschaften erfolgt nach der ÖNORM EN 12390 1-8

5.4.2.1 Prüfung der Festbeton-Druckfestigkeit von Probekörpern

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt mit Hilfe einer Prüfmaschine, womit die Probekörper (Zylinder) bis zum Bruch belastet werden.

Die Prüfkörper sind hierzu in die Druckplatten der Prüfmaschine einzuspannen und nach Aufbringung einer Ausgangsbelastung, die etwa 30% der Bruchlast beträgt, mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $0,6 \pm 0,2$ MPa/s bis zum Erreichen der Höchstlast zu belasten [94].

Die Druckfestigkeit der Festbetonprobe kann anschließend mit folgender Formel ermittelt werden:

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

f_c Druckfestigkeit, in MPa (N/mm²)

F Höchstkraft beim Bruch, in N

A_c Fläche des Probenquerschnitts, auf den die Druckbeanspruchung wirkt, in mm²

5.4.2.2 Prüfung von Festbeton-Biegezugfestigkeit von Probekörpern

Für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit sind die Prüfkörper (Balken) in die Prüfmaschine rechtwinklig zwischen zwei Auflagerrollen und zwei oberen Rollen die zur Lastaufbringung dienen, zu befestigen. Der Abstand der beiden Auflagerrollen hat die dreifache, der Abstand der oberen Rollen zueinander sowie der Abstand zu den Auflagerrollen hat die einfache Breite des Prüfkörpers zu betragen.

Für das Aufbringen der Belastung ist eine Ausgangsbelastung, die etwa 20% der Bruchlast beträgt anzusetzen. Bis zum Erreichen der Höchstlast ist die Ausgangsbelastung anschließend mit 0,04 - 0,06 MPa/s zu steigern [95].

Die Biegezugfestigkeit der Festbetonprobe kann anhand von folgender Formel ermittelt werden:

$$f_{cf} = \frac{F \times I}{d_1 \times d_2^2}$$

f_{cf} Biegezugfestigkeit, in MPa (N/mm²)

F Höchstlast, in N

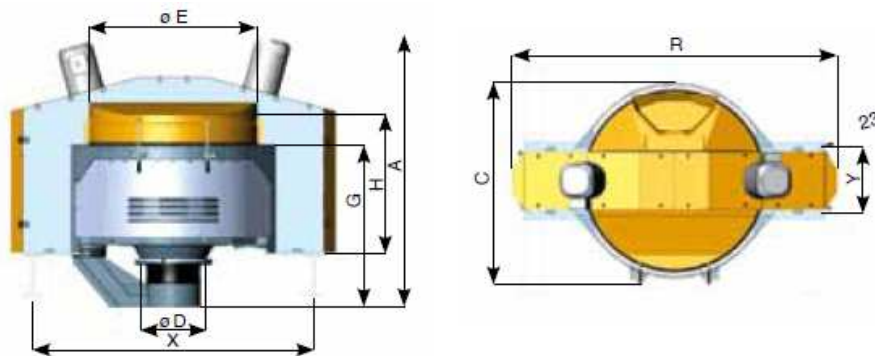
I Abstand zwischen den Auflagerrollen, in mm

d Abmessungen des Probekörpers, in mm

5.5 Mischversuche Skako Rotoconix – Teil 1

Die Mischversuche am Skako Rotoconix-Mischer wurden im Produktionswerk der Firma Skako in Lille – Frankreich durchgeführt. Hierzu wurden die im Vorfeld trockengemischten „Bindemittel-Feinkorn-Big-Bags“ und „Grobkorn-Big-Bags“ nach Lille versandt und dort bis zum Versuchsstart trocken zwischengelagert.

Als Mischer wurde ein Skako Rotoconix 750 mit folgenden Betriebseinflussgrößen verwendet:



Rotierender Mischer von SKAKO CONCRETE mit Kegeltrug

SKAKO ROTOCONIX®		750
Höchstfüllmenge /-Gewicht *	l / kg	750 / 1200
Produktion, Kompaktbeton *	l / kg	500 / 1200
Motorleistung: Trogrotation	kW	11
Motorleistung: Schnecke	kW	11
Motorleistung: Wirbler	kW	15
Trogrotation: Geschwindigkeitsbereich	U/Min	4 - 16
Schneckenrotation: Geschwindigkeitsbereich	U/Min	25 - 100
Wirblerrotation: Geschwindigkeitsbereich	U/Min	75 - 300
Reingewicht / Bruttogewicht	kg	3400 / 4600
A: Gesamthöhe	mm	2300
B: Gesamtlänge	mm	2900
C: Gesamtbreite	mm	1750
D: Durchmesser Entleerauslauf	mm	550
E: Innerer Höchstdurchmesser Trog	mm	1660
Kegelwinkel		60°
G: Troghöhe	mm	950
H: Deckelhöhe	mm	1300
I: Auslaufhöhe	mm	410
X: Länge Unterstützung	mm	2500
Y: Breite Unterstützung	mm	590

* Von Dichte abhängig

Abbildung 58 Datenblatt Skako Rotoconix [79]

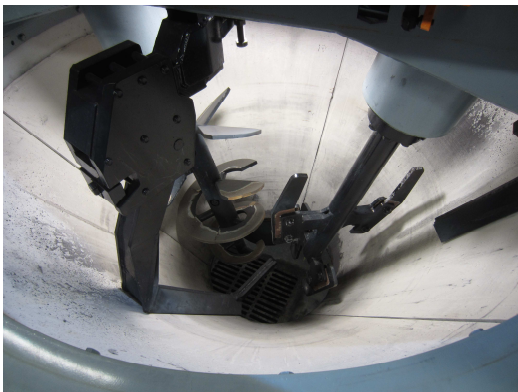
Der Mischer und die Bedienplattform sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt:



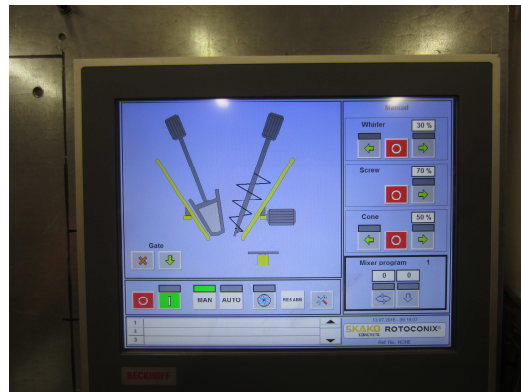
Skako Rotconix 750-Vorderseite



Skako Rotconix 750-Rückseite



Blick in den Mischtrug-Mischwerkzeuge



Touchscreen-Bedienplattform

Abbildung 59 Versuchsbedingungen im Produktionswerk der Firma Skako

5.5.1 Trockenes Einmischen von Stahlfasern und „Grobkorn“

Bevor mit den eigentlichen Nassmischversuchen begonnen werden konnte, mussten die aus organisatorischen Gründen noch nicht eingemischten Stahlfasern bzw. der Diabas vor Ort dosiert und mit dem Skako Rotoconix-Mischer trocken in die jeweiligen „Grobkorn-Premix“ eingemischt werden.

Für die SCC-Rezeptur ergab sich so eine Zugabemenge von 78,5 kg Stahlfasern. Für die F 45-Rezeptur wurden der „Grobkorn-Premix“ 50 kg Stahlfasern sowie 262 kg der Hartgesteinskörnung Diabas zugegeben.

Der Diabas wurde hierzu nach dem Wiegen einfach in den „Grobkorn-Big-Bag“ gefüllt. Die Stahlfaserzugabe in den Mischer erfolgte per Hand.

Insgesamt wurden 6 Trockenmischungen (jeweils 3 Premixe für die SCC-Rezeptur und 3 Premixe für die F 45-Rüttelbeton-Rezeptur) hergestellt.

Die Beschickung des Mixers erfolgte mit Hilfe eines Gabelstaplers der die „Grobkorn-Big-Bags“ über die Einfüllöffnung des Mixers positionierte. Durch das Öffnen des Entleerstützens an der Big-Bag-Unterseite wurde anschließend das Mischmaterial in den Mischer gefüllt.

Anschließend wurden die Stahlfasern unter ständiger Rotation der Mischwerkzeuge in den Mischer gefüllt und das trockene Grobkorn-Stahlfaser-Gemisch 3-4 Minuten gemischt.

In Abbildung 60 ist das Einmischen der Stahlfasern sowie die fertiggestellte Trockenmischung des Grobkorn-Premix dargestellt.



Abbildung 60 Einmischen der Stahlfasern in die F 45-Rezeptur (links) und fertige Trockenmischung der Grobkorn-Premix für die F 45-Rezeptur (rechts)

Im Anschluss an die fertige Trockenmischung wurde das Mischgut einer Augenscheinprüfung unterzogen. Hierbei wurde festgestellt, dass es bei der F 45-Rüttelbeton-Rezeptur zwischen den Stahlfasern und den Gesteinskörnungen zu einer Igel- bzw. Klumpenbildung (siehe Abbildung 61) kam.



Abbildung 61 Igelbildung in der „Grobkorn-Premix“

Als Ursache für die Igelbildung konnte der in Kunststoffsäcken angelieferte feuchte Diabas ausgemacht werden. Durch die Oberflächenfeuchte lagerten sich während des Trockenmischens Quarzsandpartikel sowie Stahlfasern an den Diabas an die in weiterer Folge zur Ausbildung dieser rund drei cm großen Igel führten.

Eine vor Ort durchgeführte Feuchtebestimmung des Diabas ergab, dass dieser einen Eigenfeuchtegehalt von 2,2% besaß, was somit einen Wassergehalt von 5,7 Litern pro Big-Bag entsprach.

In Abbildung 62 ist der Feuchteunterschied zwischen einer getrockneten und einer frisch aus dem Sack entnommen Probe des Diabas anhand der Farbdifferenz deutlich ersichtlich.

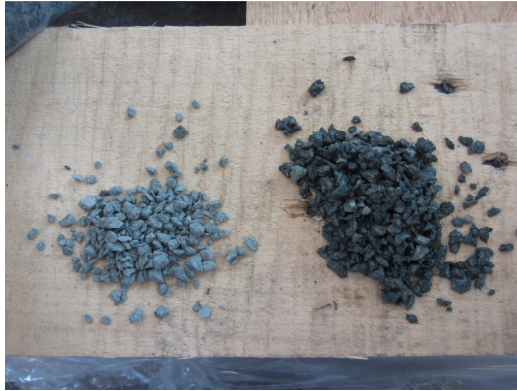


Abbildung 62 Gegenüberstellung: getrockneter vs. frisch aus dem Sack entnommener Diabas

Beim Einmischen der Stahlfasern in die Grobkorn-Premix für die SCC-Rezeptur kam es neben einer erhöhten Staubentwicklung zu keinen besonderen Vorkommnissen.

Für die weitere Verwendung des Grobkorn-Stahlfasergemisches wurde das Mischgut im Anschluss an den Trockenmischvorgang wieder in die jeweiligen Big-Bags zurückgefüllt und bis zum Nassmischen zwischengelagert.

5.5.2 Nassmischen der SCC-Rezeptur – Teil 1

Nach Abschluss des Mischprogramms für die sechs Trockenmischungen wurde mit dem Nassmischen der SCC-Rezeptur begonnen.

Hierzu wurde zu Beginn der Mischer mit einem „Bindemittel-Feinkorn-Big Bag“ beschickt. Die Beschickung erfolgte wie bei den Trockenmischungen mit Hilfe eines Gabelstaplers, der den Big-Bag über den Einfülltrichter positionierte. Durch das Öffnen des Entleerstützens an der Big-Bag-Unterseite wurde das Bindemittel-Premix in den Mischer eingefüllt.

Aufgrund der doppelten Auskleidung mittels PE-Folie des „Bindemittel-Feinkorn-Big-Bags“, der das Premix vor Feuchtezutritt schützen sollte, kam es beim Einfüllvorgang zu Problemen. Da sich die innere Auskleidung beim Beschicken des Mixers im Einfülltrichter des Mixers verfing und diesen verstopfte, kam es zu einem Rückstau bzw. zu einem „Überlaufen“ des Trichters und damit zu einem geringen Materialverlust des Premix.

Des Weiteren kam es aufgrund von Haftkräften zwischen den Partikel zur Ausbildung eines stabilen Schüttgutgewölbes im Big-Bag, wodurch die Big-Bag-Entleerung weiter verzögert wurde.

Die Einfüllprobleme der Bindemittel-Premix hatten einen Zeitverlust von drei Minuten zur Folge.

Die Beschickung des Mixers mit der Bindemittel-Premix ist in Abbildung 63 dargestellt.



Abbildung 63 Einfüllen des „Bindemittel-Feinkorn-Big-Bags“ (links) und Rückstau und Verlust der Premix beim Einfüllen (rechts)

Nach dem Einfüllen der Bindemittel-Premix wurde der Mischer gestartet und umgehend mit der Wasser- und Fließmittelzugabe begonnen. Von den benötigten 89,55 kg Anmachwasser konnten 60 kg über die Dosieranlage des Mixers zugegeben werden. Das restliche Wasser sowie das Fließmittel und der Erstarrungsverzögerer wurden per Hand bzw. mittels Kübeln in den Mischer eingebracht (siehe Abbildung 64).



Abbildung 64 Fließmittelzugabe per Hand

Mit Beginn der Wasser- und Fließmittelzugabe betrug die Werkzeuggeschwindigkeit in der Werkzeugachse bzw. die Trogrotationsgeschwindigkeit folgende Werte:

- Wirtler: 2,8 m/s bzw. 91 U/min
- Schnecke 2,7 m/s bzw. 86 U/min
- Trog 0,7 m/s bzw. 9 U/min

Bei der Herstellung der Bindemittelsuspension erreichte das Schneckenwerkzeug aufgrund der Kapillarkräfte im zunächst teilbefeuchteten Bindemittel-Kornhaufwerk bei gleichbleibender Rotationsgeschwindigkeit eine Leistungsaufnahme von bis zu 6 kW. Mit dem Übergang zur Suspension fiel die Leistungsaufnahme auf 1,5 kW ab.

Um eine hohe Scherrate zu erreichen und die Agglomerate im Mischgut aufzubrechen, wurde die Rotationsgeschwindigkeit des Wirblers auf bis

zu 6,1 m/s (197 U/min) gesteigert. Die Leistungsaufnahme des Wirblers erreichte hierbei einen Maximalwert von 11 kW.

Der Übergang vom Kornhaufwerk zur Suspension begann rund eine Minute nach dem Ende der Wasser- und Fließmittelzugabe. Eine komplette Verflüssigung stellte sich nach einer Mischzeit von ca. vier Minuten ein.

Der Energieumsatz (kW) für die beiden Mischwerkzeuge bzw. für den Trog wurde auf drei separaten Monitoren im Steuerschrank des Mixers aufgezeichnet.

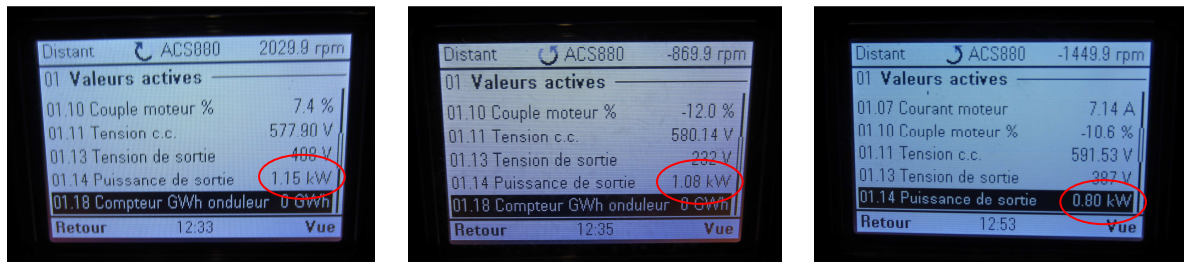


Abbildung 65 Monitor zur Bestimmung der Leistungsaufnahme des Wirblers (links), der Schnecke (Mitte) und des Mischtrogs (rechts)

Da die Aufzeichnung einer Messkurve für die Leistungsaufnahme der Mischwerkzeuge aufgrund eines Softwarefehlers nicht direkt möglich war, wurden die einzelnen Werte der Leistungsaufnahme während des Mischprozesses händisch protokolliert.

Nach dem Umschlag des Feinkornmischunges in eine Suspension bzw. zu einem Bindemittelleim wurde mit der Zugabe des „Grobkorn-Stahlfaser-Big-Bags“ begonnen.

Während die Rotationsgeschwindigkeit der Schnecke und des Trogs konstant auf 2,7 m/s (86 U/min) und 0,7 m/s (9 U/min) gehalten wurde, wurde die Rotationsgeschwindigkeit des Wirblers auf 2,8 m/s (91 U/min) abgesenkt.

Die Zugabe der Grobkorn-Stahlfaser-Premix in den Bindemittelleim führte dazu, dass sich aus dem flüssigen Bindemittelleim ein Mischgut mit hoher Viskosität entwickelte und die Leistungsaufnahme des Wirblers auf die maximal mögliche Motorleistung (15 kW) anstieg.

Das zähe Mischgut führte in weiterer Folge dazu, dass die maximale Motorleistung des Wirblermotors nicht ausreichte um den Beton mit den festgelegten 90 U/min zu mischen. Bedingt durch die limitierte Motorleistung und der hohen Viskosität des Mischguts kam es zu einem Abfall der Wirblerrotationsgeschwindigkeit auf 0,9 m/s (30 U/min).

Die hohe Stromaufnahme und ein zu schwach dimensioniertes Stromkabel führten zu einem Kabelbrand und somit 40 Sekunden nach der Zugabe der Grobkorn Premix zum Stillstand des Wirblers.

Durch den Ausfall des Wirblers folgte eine weitere Vermischung nur noch durch die Rotation der Zwei-Wege-Schnecke.

Da der Ausfall des Wirblers auch durch einen kompletten Neustart des Mixers und der Bediensoftware nicht behoben werden konnte, wurde

der Mischprozess mit der Zwei-Wege-Schnecke (bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 2,7 m/s (86 U/min)) für neun Minuten fortgesetzt.

Anschließend wurde der Mischer angehalten und es erfolgte eine Augenscheinprüfung des Frischbetons. Nach der visuellen Beurteilung (stochern mit der Kelle) des Frischbetons wurde dem Frischbeton der Entschäumer beigegeben und der Beton nochmals zwei Minuten lang gemischt bevor dieser entleert wurde.

Die verschiedenen Stadien des Mischprozesses sind in den folgenden Abbildungen dargestellt:



Wasser- und Fließmittelzugabe



Ausbildung von Agglomeraten



Beginn der Verflüssigung



Fortschreitende Verflüssigung



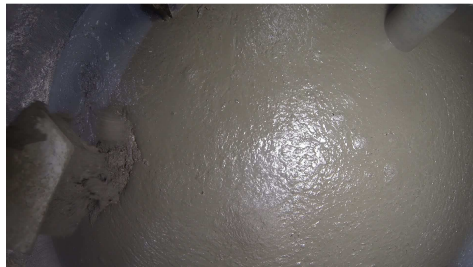
Verflüssigter Bindemittelleim



Zugabe Grobkorn-Premix



Einmischen Grobkorn-Premix



Augenscheinprüfung des Frischbetons



Zugabe des Erstarrungsverzögerer



Entleerung

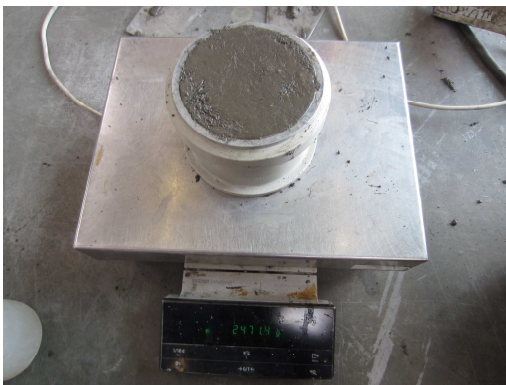
Abbildung 66 Mischprozessstadien



Setzfließmaß-Hägermann



Setzfließmaß-Abrams



Rohdichte



Luftgehalt

Abbildung 68 Frischbetonprüfungen

Neben den Frischbetonprüfungen wurden auch sechs Prüfbalken (150 x 150 x 700 mm) sowie sechs Prüfzylinder (110 x 210 mm) für die späteren Festbetonprüfungen angefertigt.

5.5.2.2 Festbetonprüfungen SCC-Rezeptur

Im Zuge der Festbetonprüfungen wurde die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit der Prüfkörper bestimmt. Des Weiteren wurde ebenso der E-Modul der Prüfzylinder ermittelt. Aus organisatorischen Gründen konnten die Festbetonprüfung erst 40 Tage nach den Mischversuchen durchgeführt werden.

Ermittlung der Biegezugfestigkeit

Für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit wurden die Prüfkörper entsprechend der Versuchsbeschreibung in Kapitel 5.4.2.2 in die Prüfmaschine eingebaut und bis zum Erreichen einer Verformung von 5 mm belastet.

Insgesamt wurden sechs Prüfbalken mit den Abmessungen 150 x 150 x 700 mm geprüft.

Die Versuchsanordnung sowie das Risswachstum im Prüfkörper sind in Abbildung 69 dargestellt.



Abbildung 69 Versuchsordnung und Risswachstum des Prüfkörpers

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsuntersuchungen sind in Diagramm 1 dargestellt. Die maximale Biegezugfestigkeit bei einer Verformung von 1,0 mm wurde mit $21,0 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Die geringste Biegezugfestigkeit bei gleicher Verformung wurde bei einer Biegespannung von $9,7 \text{ N/mm}^2$ gemessen.

Die mittlere Biegezugfestigkeit bei einer Verformung von 1,0 mm erreichte einen Wert von $14,5 \text{ N/mm}^2$.

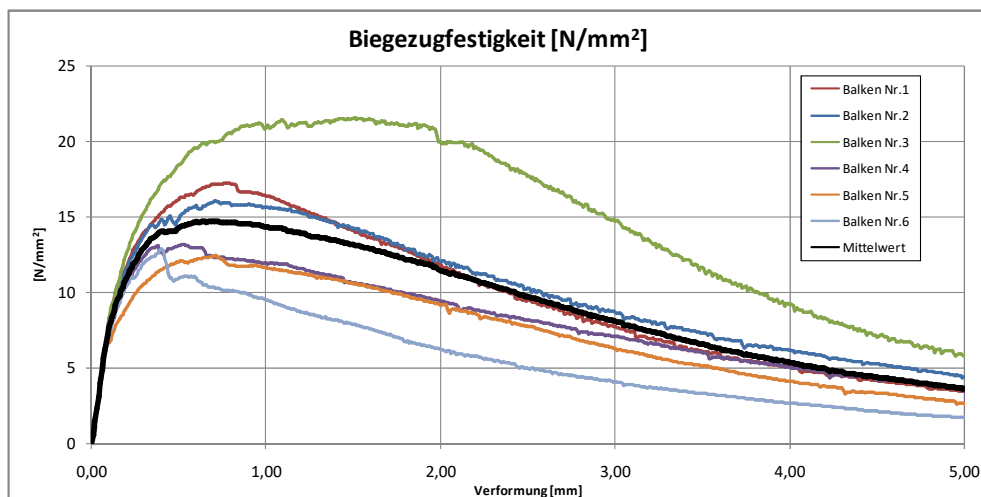


Diagramm 1 Biegezugfestigkeit SCC-Rezeptur - Teil 1

Vergleicht man die unterschiedlichen Biegespannungsverläufe fällt die große Streuung auf. Bei einer Verformung von 1,0 mm wurde ein Variationskoeffizient mit einem Wert von 29,5 ermittelt.

Ermittlung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

Der E-Modul und die Druckfestigkeit der SCC-Rezeptur wurden anhand von sechs Zylinderproben (110 x 210 mm) ermittelt. Hierzu wurden die Probekörper plangeschliffen und wie in Kapitel 5.4.2.1 beschrieben in die Prüfmaschine eingebaut und bis zum Bruch belastet. Für die Ermittlung des E-Moduls wurden an jeder Zylinderprobe zwei Wegaufnehmer befestigt.

Die Versuchsordnung ist in Abbildung 70 dargestellt.

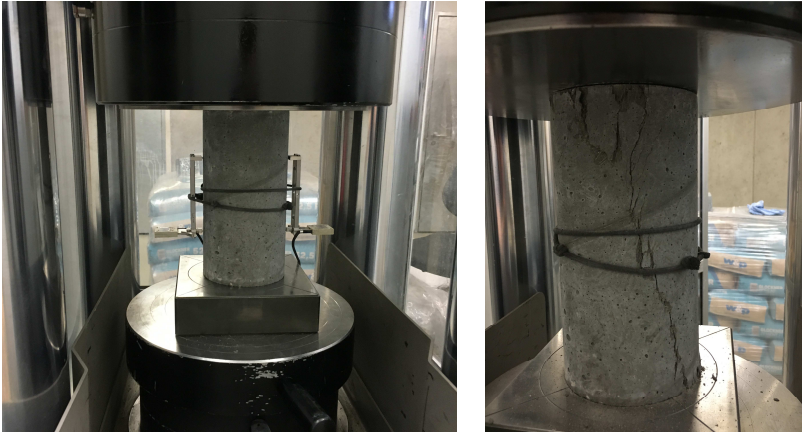


Abbildung 70 Ermittlung des E-Moduls mittels Wegaufnehmer (links) und zerstörter Prüfkörper infolge der Druckfestigkeitsprüfung (rechts)

Die Versuchsergebnisse der E-Modul- und Druckfestigkeitsuntersuchungen sind in Diagramm 2 und Diagramm 3 dargestellt.

Als Mittelwert für den E-Modul konnte ein Wert von 46.520 N/mm^2 bestimmt werden. Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit beträgt $140,5 \text{ N/mm}^2$.

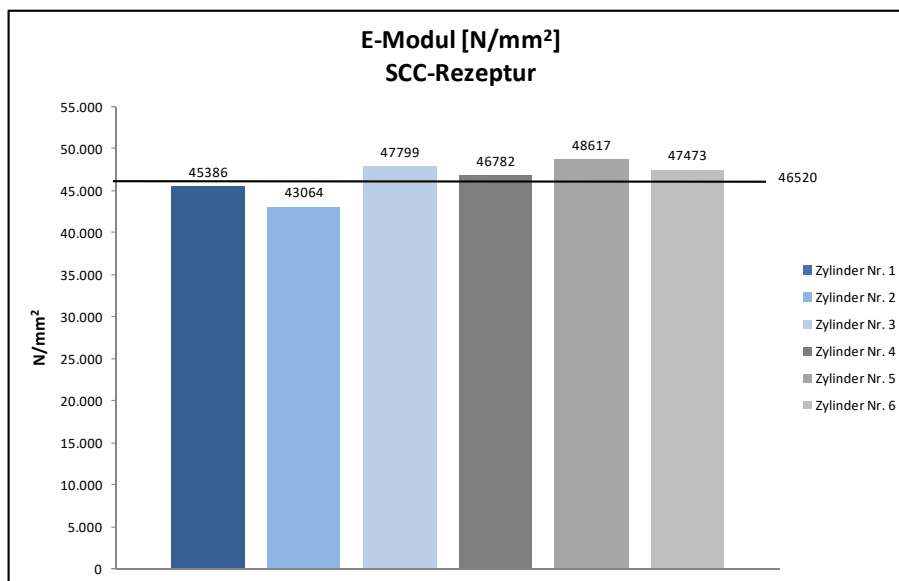


Diagramm 2 E-Modul der Zylinderproben für die SCC-Rezeptur

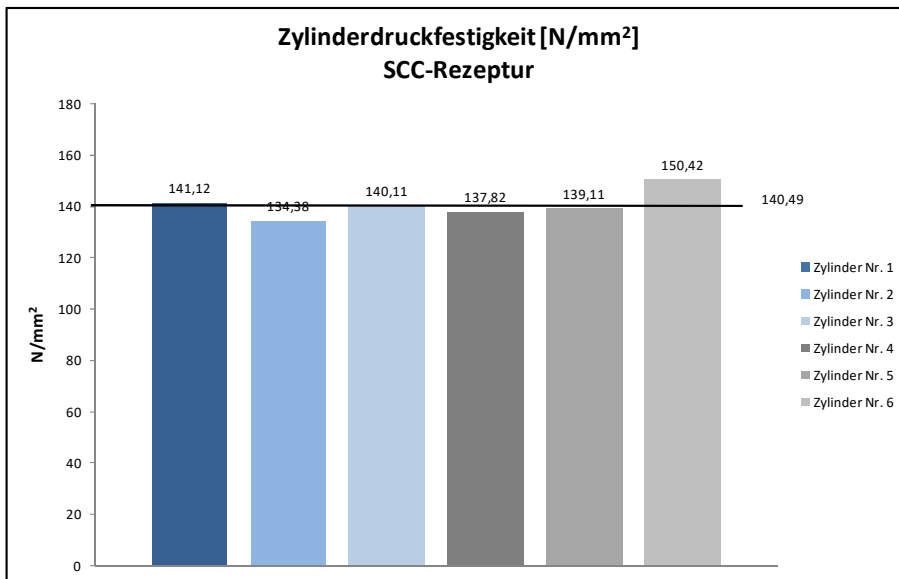


Diagramm 3 Druckfestigkeit der Zylinderproben für die SCC-Rezeptur

5.5.3 Nassmischen einer F 45-Rezeptur – Teil 1

Bedingt durch den Ausfall des Wirblermotors und der damit verbundenen Störung des Mischprozesses wurde auf das Nassmischen der F 45-Rezeptur verzichtet.

5.6 Mischversuche Skako Rotoconix – Teil 2

Aufgrund des Ausfalls des Wirblermotors und der damit verbundenen Beeinträchtigung des Mischprozesses wurde der Motor für eine neuerliche Versuchsreihe an die Frischbetoneigenschaften angepasst und rund drei Monate nach dem ersten Mischversuch ein zweiter Versuch gestartet.

Für die Durchführung der zweiten Versuchsreihe wurden am Mischer folgende Anpassungen vorgenommen:

- Vergrößerung des Stromkabelquerschnittes des Wirblermotors von 4 auf 10 mm².
- Austausch des Wirblermotors von einem 15 kW Motor auf ein 22 kW Modell.
- Vergrößerung der Getriebeuntersetzung des Wirblermotors wodurch das maximale Drehmoment des Wirblers von 931 auf 1651 Nm gesteigert wurde (+77 %).

Durch die Erhöhung des maximalen Drehmoments sollte ein Blockieren des Wirblers aufgrund der hohen Widerstandskräfte im Mischgut nach der Zugabe des „Grobkorn-Premix“ verhindert werden. Umgekehrt proportional führte der Motortausch (22 kW) und die Erhöhung des maximalen Drehmoments um 77% zu einer Reduktion der maximalen Drehzahl um 17%.

5.6.1 Probenentnahme der „Grobkorn-Premix“

Um Aufschluss über die Faserverteilung in den Big-Bags zu bekommen wurden während des Einfüllprozesses der „Grobkorn-Premix“ sowohl für die SCC- als auch für die F 45-Rezeptur an unterschiedlichen Stellen bzw. zu unterschiedlichen Einfüllzeitpunkten Partikelproben entnommen.

Zur Auswertung des Fasergehalts wurden die in den Proben befindlichen Stahlfasern mit Hilfe eines Magneten selektiert und im Anschluss sowohl das Gewicht der trockenen Grobkornpartikel als auch das der Stahlfasern bestimmt.



Abbildung 71 Trennung der Stahlfasern mittels Magneten

Die Untersuchungsergebnisse zur Faserverteilung in der „Grobkorn-Premix“ sind in Tabelle 5 dargestellt.

Lfd.Nr.	Probenbezeichnung	Gesamtgewicht [g]	Gewicht Gesteinskörnung [g]	Gewicht Stahlfasern [g]	Fasergehalt [%]	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]
[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]
1	SCC-1	445,5	385,7	59,8	15,5	16,7	4,3
2	SCC-2	466,6	379,2	87,4	23,0		
3	SCC-3	554,5	486,7	67,8	13,9		
4	SCC-4	398,4	348,9	49,5	14,2		
5	F-45-1	588,5	548,1	40,4	7,4	8,4	0,7
6	F-45-2	853,7	787,6	66,1	8,4		
7	F-45-3	878,8	810,7	68,1	8,4		
8	F-45-4	659,7	603,5	56,2	9,3		
9	F-45-5	852,9	785,6	67,3	8,6		

Tabelle 5 Fasergehalt in der Trockenmischproben

Aus Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass die Stahlfasern sowohl in der „Grobkorn-Premix“ der SCC- als auch in der F 45-Rezeptur (bis auf einen Ausreißer (SCC-2)) über die gesamte Füllhöhe des Big-Bags homogen verteilt sind.

5.6.2 Nassmischen der F 45-Rezeptur – Teil 2

Analog zu den Mischversuchen im ersten Teil wurde auch im zweiten Teil folgendes Mischregime festgelegt:

- Befüllung des Mixers mit der „Bindemittel-Feinkorn-Premix“
- Zugabe des Anmachwassers und der Betonzusatzmittel

- Herstellung der Bindemittelsuspension
- Zugabe des „Grobkorn-Premix“
- Einmischen der „Grobkorn-Premix“ in die Bindemittelsuspension
- Zugabe des Entschäumers
- Entleerung

Beim Befüllen des Mischers mit dem „Bindemittel-Feinkorn-Premix“ kam es wie schon bei den Mischversuchen im ersten Teil aufgrund des engen Entleerstützens sowie der doppelten Big-Bag-Auskleidung zu Einfüllproblemen. Im Big-Bag bildete sich wiederum ein Schüttgutgewölbe aus, welches eine schnelle Entleerung verhinderte.

Für eine vollständige Entleerung musste der Big-Bag im letzten Befüllabschnitt daher aufgeschnitten werden.

Nach einer ca. 30 sekundigen Trockenmischphase erfolgte die Flüssigkeitszugabe (Wasser, Fließmittel und Erstarrungsverzögerer)

Um die Wasserzugabe zu beschleunigen, wurde anders als im ersten Teil der Mischversuche die gesamte Wasserzugabe mittels Kübeln durchgeführt.

Mit Beginn der Wasser- und Fließmittelzugabe betrug die Werkzeuggeschwindigkeit in der Werkzeugachse bzw. die Trogrotationsgeschwindigkeit folgende Werte:

- Wirbler: 2,8 m/s bzw. 89 U/min
- Schnecke 2,7 m/s bzw. 86 U/min
- Trog 0,7 m/s bzw. 9 U/min

Bei der Herstellung der Bindemittelsuspension erreichte das Schneckenwerkzeug aufgrund der Kapillarkräfte im zunächst teilbefeuchteten Bindemittel-Kornhaufwerk bei gleichbleibender Rotationsgeschwindigkeit eine Leistungsaufnahme von bis zu 8 kW. Mit dem Übergang zur Suspension fiel die Leistungsaufnahme auf 2 kW ab.

Um eine hohe Scherrate zu erreichen und die Agglomerate im Mischgut aufzubrechen, wurde die Rotationsgeschwindigkeit des Wirblers auf bis zu 6,4 m/s (203 U/min) gesteigert. Die Leistungsaufnahme des Wirblers erreichte hierbei einen Maximalwert von 16 kW.

Der Übergang vom Kornhaufwerk zur Suspension startete eine Minute nach dem Ende der Wasser- und Fließmittelzugabe. Eine komplette Verflüssigung stellte sich nach einer Mischzeit von ca. fünf Minuten ein.

Der Verlauf der Leistungsaufnahme der Mischwerkzeuge während der Herstellung der Bindemittelsuspension ist in Abbildung 72 dargestellt.

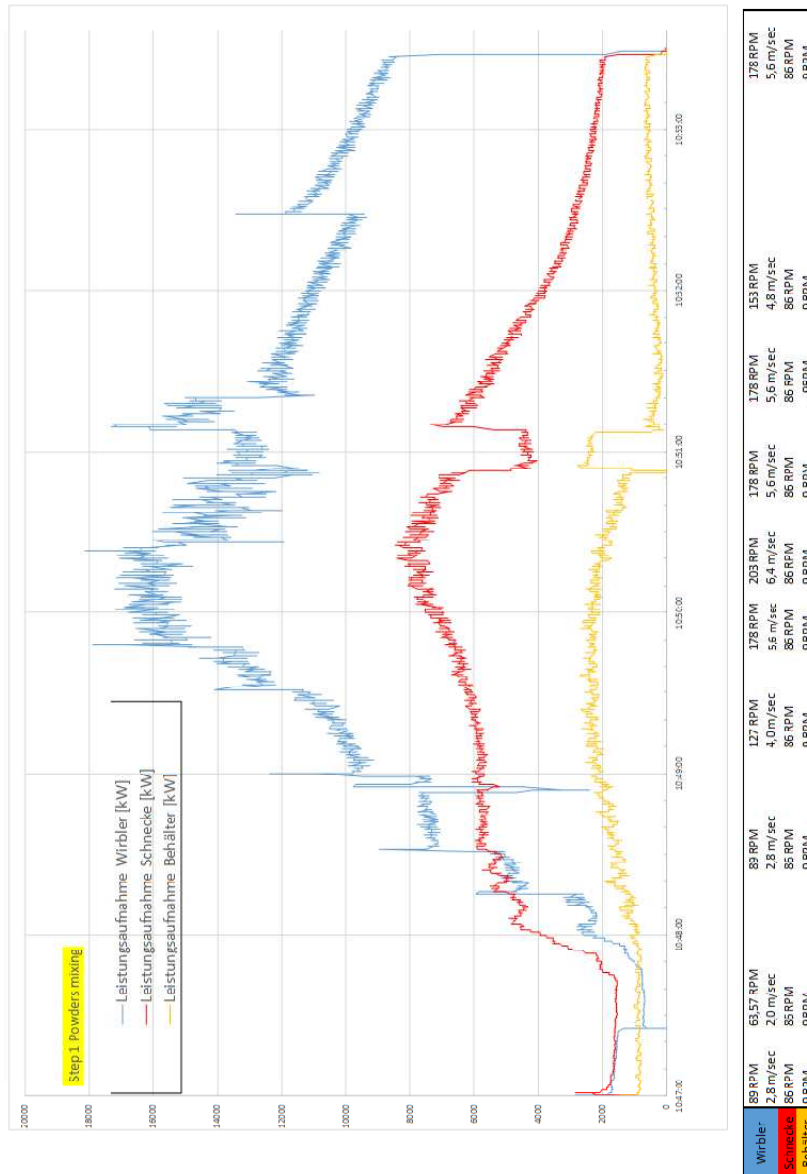
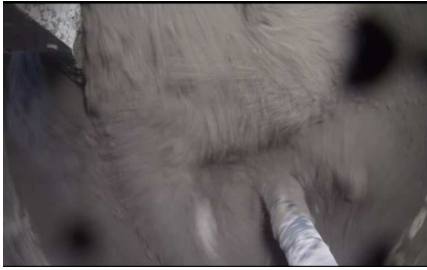


Abbildung 72 Verlauf der Leistungsaufnahme der Mischwerkzeuge bei der Herstellung der Bindemittelsuspension

Abbildung 72 zeigt für die Herstellung der Bindemittelsuspension der F 45-Rezeptur den bereits aus Kapitel 4.2 bekannten Verlauf der Leistungsaufnahme der Mischwerkzeuge. Hierbei kommt es vor dem Umschlagen zur Suspension, im teilbefeuchteten Partikelgemisch aufgrund der Ausbildung von Granulaten vor allem beim Wirbler zu einer Steigerung der Leistungsaufnahme von 2 auf 16 kW bzw. bei der Schnecke von 2 auf 8 kW. Der Übergang vom Partikelgemisch in eine Suspension nach einer vierminütigen Mischzeit ist durch die abfallende Leistungsaufnahme der Mischwerkzeuge erkennbar.

Die verschiedenen Stadien des Mischprozesses bei der Herstellung der Bindemittelsuspension sind in Abbildung 73 dargestellt:



Wasser- und Fließmittelzugabe



Verteilung der Flüssigkeiten – Ausbildung von Agglomeraten



Maximale Leistungsaufnahme des Wirblers – Beginn der Verflüssigung



Verflüssigte Bindemittelsuspension



Bindemittelleim vor der Zugabe der „Grobkorn-Premix“

Abbildung 73 Mischprozessstadien bei der Herstellung der Bindemittelsuspension

Nach einer kurzen visuellen Beurteilung der Bindemittelsuspension erfolgte die Zugabe des „Grobkorn-Premix“.

Während die Rotationsgeschwindigkeit der Schnecke und des Troges konstant auf 2,7 m/s (86 U/min) bzw. 0,7 m/s (9 U/min) gehalten wurde, wurde die Rotationsgeschwindigkeit des Wirblers auf 2,4 m/s (76 U/min) abgesenkt.

Die Leistungskurven der Mischwerkzeuge nach der Zugabe des „Grobkorn-Premix“ sind in Abbildung 74 zu sehen.

Durch die Zugabe des gesamten Big-Bag-Inhalts in die Bindemittelsuspension kam es zu einem schlagartigen Anstieg der Widerstandskräfte im Mischgut und somit zu einem sprunghaften Anstieg der Leistungsaufnahme beider Mischwerkzeuge (siehe Abbildung 74). Der Wirbler erreichte hierbei einen Maximalwert von 23 kW. Die hochviskose und klebrige Frischbetonkonsistenz führte dazu, dass es nach einer einminütigen Mischzeit zum Abreißen der Mischpaddel (4 Stk.) an der Zwei-Wege-Schnecke kam. Die maximale Leistungsaufnahme der Schnecke betrug vor dem Bruch der Mischpaddel 15 kW.



Zugabe des „Grobkorn-Premix“



Anstieg der Leistungsaufnahme aufgrund von hohen Widerstandskräften



„Aufschaukeln“ des Materials bei der ruhenden Schnecke



Zwischenzeitlicher Mischzustand



Endzustand kurz vor der Entleerung



Entleerung des Mischbehälters

Abbildung 75 Mischprozessstadien beim Einmischen der „Grobkorn-Premix“

Nach einer Mischzeit von insgesamt neun Minuten erreichte die Leistungsaufnahme des Wirblers eine horizontale Tangente (siehe Abbildung 76) sodass der Mischprozess beendet wurde. Die Wirblergeschwindigkeit wurde in dieser Mischphase auf 1,6 m/s reduziert um so eine Störung durch die abgebrochenen Paddel zu vermeiden.

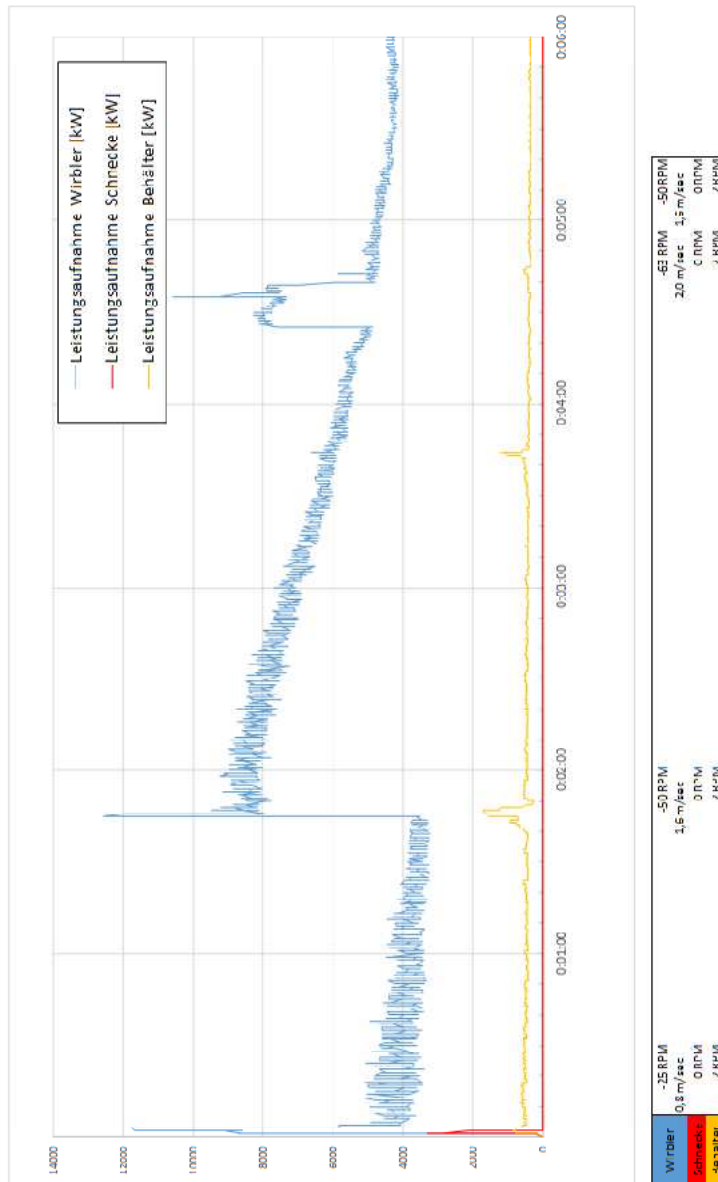


Abbildung 76 Leistungsaufnahme bis zum Erreichen der Stabilisationszeit

Aufgrund eines Fehlers bei der Materialzugabe weist die gemischte Rezeptur einen geringfügig höheren Wassergehalt auf (+9,3 Liter) als die ursprünglich geplante F-45-Rezeptur auf. Der W/B-Wert erhöhte sich somit von 0,23 auf 0,24.

5.6.2.1 Frischbetonprüfungen F 45-Rezeptur

Die Frischbetonprüfungen wurden analog zu den Prüfungen aus den Mischversuchen aus Teil 1 gestaltet (siehe Kapitel 5.5.2.1).

Die Frischbetontemperatur wurde unmittelbar vor der Entleerung des Betons bestimmt und betrug 23,3°C. Die hier im Vergleich zu den Mischversuchen aus Teil 1 um 10°C niedrigere Frischbetontemperatur ergibt sich einerseits daraus, dass der Mischtrog durch eine Premixerzeugung (Einmischen der Stahlfasern und des Diabas in das Grobkorntrocken-

gemischt - siehe Kapitel 5.5.1) nicht schon im Vorfeld erwärmt wurde und andererseits aufgrund eines kürzeren Mischprozesses (keine Motorprobleme). Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt:

Setzfließmaß Hägermanntrichter				
Lfd.Nr.	[A]	[B]	[C]	[D]
1		D1	27,50	cm
2		D2	26,00	cm
3		Fließmaß	26,75	cm

Ausbreitmaß				
Lfd.Nr.	[A]	[B]	[C]	[D]
1		D1	62,00	cm
2		D2	64,20	cm
3		Fließmaß	63,10	cm
4		T ₅₀₀	20	sec

Rohdichte und Luftgehalt				
Lfd.Nr.	[A]	[B]	[C]	[D]
1		Rohdichte	2516	kg/m ³
2		Luftgehalt	1,40	%

Tabelle 6 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen für die F 45 Rezeptur

Neben den Frischbetonprüfungen wurden auch sechs Prüfbalken (150 x 150 x 700 mm) sowie sechs Prüfzylinder (110 x 210 mm) für die späteren Festbetonprüfungen angefertigt.

5.6.2.2 Festbetonprüfungen

Im Zuge der Festbetonprüfungen wurde die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit der Prüfkörper bestimmt. Des Weiteren wurde ebenso der E-Modul der Prüfzylinder ermittelt. Aus organisatorischen Gründen konnten die Festbetonprüfung erst 34 Tage nach den Mischversuchen durchgeführt werden.

Ermittlung der Biegezugfestigkeit

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsuntersuchungen sind in Diagramm 4 dargestellt. Die maximale Biegezugfestigkeit bei einer Verformung von 1,0 mm wurde mit 16,2 N/mm² ermittelt. Die geringste Biegezugfestigkeit bei gleicher Verformung wurde mit 11,3 N/mm² gemessen.

Die mittlere Biegezugfestigkeit erreichte einen Wert von 13,7 N/mm².

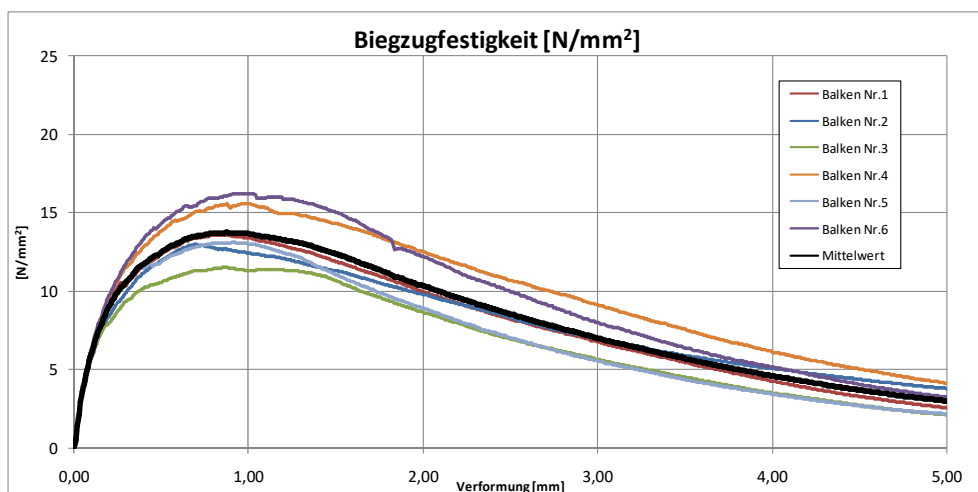


Diagramm 4 Biegezugfestigkeit F 45-Rezeptur - Teil 2

Die Schwankungsbreite der Biegezugfestigkeit für die sechs getesteten Balken liegt mit einem Variationskoeffizienten von 13,8 deutlich unter jenem aus der ersten Versuchsanordnung (siehe Diagramm 1).

Ermittlung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

Die Versuchsergebnisse der E-Modul- und Druckfestigkeitsuntersuchungen sind in Diagramm 5 und Diagramm 6 dargestellt.

Als Mittelwert für den E-Modul konnte ein Wert von 44.354 N/mm^2 bestimmt werden. Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit beträgt $139,6 \text{ N/mm}^2$.

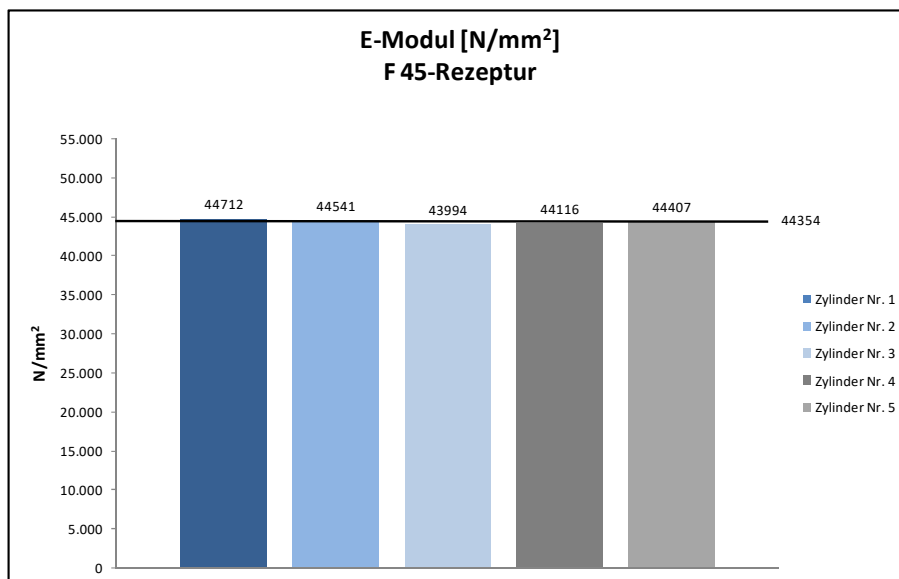


Diagramm 5 E-Modul der Zylinderproben für die F 45-Rezeptur

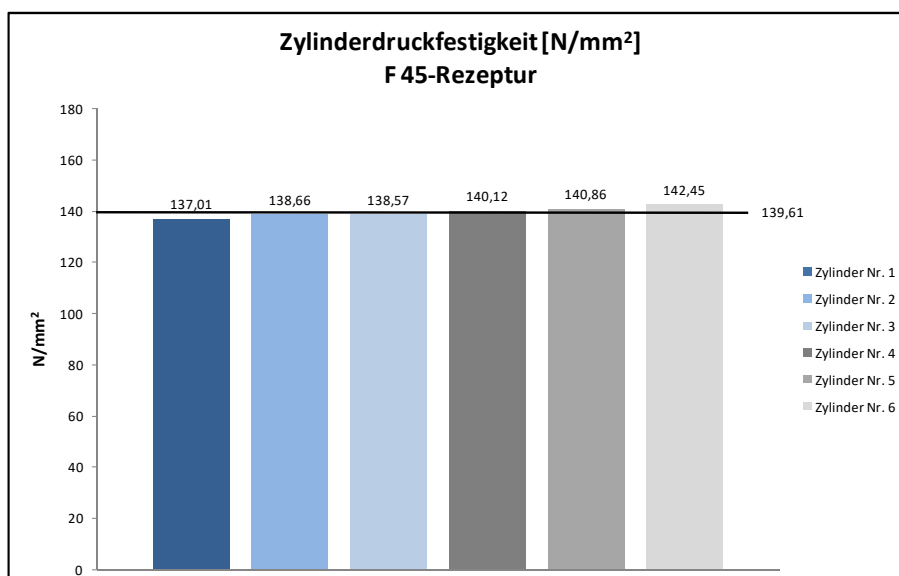


Diagramm 6 Druckfestigkeit der Zylinderproben für die F 45-Rezeptur

5.6.3 Nassmischen der SCC-Rezeptur – Teil 2

Nach Abschluss des Nassmischprozesses der F 45-Rezeptur wurde mit dem Nassmischen der SCC-Rezeptur gestartet.

Der Einfüllprozess der „Feinkorn-Bindemittel-Pemix“ dauerte aufgrund der beschriebenen Einfüllprobleme sechs Minuten.

Nach einer ca. 30 sekündigen Trockenmischphase erfolgte die Flüssigkeitszugabe (Wasser, Fließmittel und Erstarrungsverzögerer)

Bedingt durch die manuelle Zugabe des Anmachwassers und der Betonzusatzmittel mittels Kübeln dauerte es rund 1,5 Minuten bis sämtliche Flüssigkeiten in den Mischbehälter eingebracht waren.

In Tabelle 7 wird der Verlauf der Werkzeuggeschwindigkeiten während der Herstellung der der Bindemittelsuspension tabellarisch dargestellt.

Werkzeuggeschwindigkeiten Bindemittelsuspension SCC-Rezeptur								
Lfd.Nr.	Werkzeug	00:00	00:38	01:15	01:30	02:07	02:15	02:47
[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[I]
1	Wirbler	64 U/min 2,0 m/sec	64 U/min 2,0 m/sec	89 U/min 2,8 m/sec	89 U/min 2,8 m/sec	127 U/min 4,0 m/sec	153 U/min 4,8 m/sec	178 U/min 5,6 m/sec
2	Schnecke	86 U/min	86 U/min	86 U/min	86 U/min	86 U/min	86 U/min	86 U/min
3	Behälter	9 U/min	9 U/min	9 U/min	9 U/min	9 U/min	9 U/min	9 U/min
		03:50	04:06	04:14	04:29	06:48	07:52	08:28
4	Wirbler	203 U/min 6,4 m/sec	203 U/min 6,4 m/sec	203 U/min 6,4 m/sec	178 U/min 5,6 m/sec	153 U/min 4,8 m/sec	153 U/min 4,8 m/sec	Stopp
5	Schnecke	86 U/min	86 U/min	86 U/min	86 U/min	86 U/min	86 U/min	
6	Behälter	9 U/min	9 U/min	9 U/min	9 U/min	9 U/min	9 U/min	

Tabelle 7 Verlauf der Werkzeuggeschwindigkeiten bei der Herstellung der Bindemittelsuspension

Bei der Herstellung der Bindemittelsuspension erreichte das Schneckenwerkzeug aufgrund der Kapillarkräfte im zunächst teilbefeuchteten Bindemittel-Kornhaufwerk bei gleichbleibender Rotationsgeschwindigkeit eine Leistungsaufnahme von bis zu 8 kW. Mit dem Übergang zur Suspension fiel die Leistungsaufnahme auf 2 kW ab.

Um eine hohe Scherrate zu erreichen und die Agglomerate im Mischgut aufzubrechen, wurde die Rotationsgeschwindigkeit des Wirblers auf bis zu 6,4 m/s (203 U/min) gesteigert. Die Leistungsaufnahme des Wirblers erreichte hierbei wiederum einen Maximalwert von 16 kW.

Der Übergang vom Kornhaufwerk zur Suspension startete eine Minute nach dem Ende der Wasser- und Fließmittelzugabe. Eine komplette Verflüssigung stellte sich nach einer Mischzeit von ca. viereinhalb Minuten ein.

Die verschiedenen Stadien des Mischprozesses bei der Herstellung der Bindemittelsuspension sind in Abbildung 77 dargestellt:



„Bindemittel-Feinkorn-Premix“



Wasser- und Fließmittelzugabe



Ausbildung von Agglomeraten



Anwachsen der Agglomerate



Beginn der Verflüssigung



Zunahme der Verflüssigung



Fortschreitende Verflüssigung



Vollkommene Verflüssigung

Abbildung 77 Mischprozessstadien bei der Herstellung der Bindemittelsuspension

Trotz einer Werkzeuggeschwindigkeit von 6,4 m/s konnten in der nachfolgenden visuellen Beurteilung der Bindemittelsuspension nachwievor kleine Agglomerate (0,1-1 mm) ausgemacht werden.

Im Anschluss an die visuelle Beurteilung der Bindemittelsuspension erfolgte wiederum die Zugabe der „Grobkorn-Premix“.

Durch die Zugabe des gesamten Big-Bag-Inhalts in die Bindemittelsuspension kam es erneut zu einem schlagartigen Anstieg der Widerstandskräfte im Mischgut und somit zu einem sprunghaften Anstieg der Leistungsaufnahme der beiden Mischwerkzeuge.

Während die Rotationsgeschwindigkeit der Schnecke und des Troges konstant auf 2,7 m/s (86 U/min) und 0,7 m/s (9 U/min) gehalten wurde,

wurde die Rotationsgeschwindigkeit des Wirblers nach der Zugabe der „Grobkorn-Premix“ auf 2,0 m/s (64 U/min) abgesenkt. Nach einer Mischzeit von rund drei Minuten wurde die maximale Leistungsaufnahme des Wirblers (22 kW) erreicht. Um die Zähigkeit der Mischung zu reduzieren wurde nach sechs Minuten eine Nachdosierung des Wassers (+1 Liter) vorgenommen. Die zusätzliche Wasserzugabe führte zu einem Absinken der Leistungsaufnahme des Wirblers von 11,5 auf 10 kW.

Die Gesamtmischzeit der zweiten Mischphase (Einmischen des „Grobkorn-Premix“ in die Bindemittelsuspension) belief sich auf rund acht Minuten.

Werkzeuggeschwindigkeiten Einmischen "Grobkorn-Premix" SCC-Rezeptur								
Lfd.Nr.	Werkzeug	00:00	00:49	00:58	01:08	01:24	01:35	01:55
[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[I]
1	Wirbler	64 U/min 2,0 m/sec	-64 U/min -2,0 m/sec	64 U/min 2,0 m/sec	-64 U/min -2,0 m/sec	64 U/min 2,0 m/sec	-64 U/min -2,0 m/sec	64 U/min 2,0 m/sec
2	Schnecke	86 U/min	-86 U/min	86 U/min	-86 U/min	86 U/min	-86 U/min	86 U/min
3	Behälter	9 U/min	-9 U/min	9 U/min	-9 U/min	9 U/min	-9 U/min	-9 U/min
		02:10	02:18	03:38	02:49	03:16	05:00	07:40
4	Wirbler	64 U/min 2,0 m/sec	-64 U/min -2,0 m/sec	64 U/min 2,0 m/sec	-64 U/min -2,0 m/sec	64 U/min 2,0 m/sec	89 U/min 2,0 m/sec	Stopp
5	Schnecke	86 U/min	-86 U/min	86 U/min	-86 U/min	86 U/min	86 U/min	
6	Behälter	9 U/min	-9 U/min	9 U/min	-9 U/min	-9 U/min	-9 U/min	

Tabelle 8 Verlauf der Werkzeuggeschwindigkeiten beim Einmischen des „Grobkorn-Premix“

Die verschiedenen Stadien des Mischprozesses beim Einmischen des „Grobkorn-Premix“ sind in Abbildung 78 dargestellt:



T=0 min



T=1 min



T=2 min



T=3 min



T=4 min



T=5 min



T=6 min



T=7 min



T=8 min

Abbildung 78 Mischprozessstadien beim Einmischen der „Grobkorn-Premix“

Bevor der Mischbehälter entleert wurde, erfolgte im Anschluss an das Einmischen der „Grobkorn-Premix“ noch das Einmischen des Entschäumers (1 min).

5.6.3.1 Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur

Die Frischbetontemperatur wurde unmittelbar vor der Entleerung des Betons bestimmt und betrug 25,4°C.

Die Ergebnisse sowie Bilder der Frischbetonprüfungen sind in den nachfolgenden Tabellen bzw. Abbildungen dargestellt:

Lfd.Nr.	Setzfließmaß Hägermanntrichter		
[A]	[B]	[C]	[D]
1	D1	25,00	cm
2	D2	25,50	cm
3	Fließmaß	25,25	cm

Lfd.Nr.	Setzfließmaß Abramstrichter		
[A]	[B]	[C]	[D]
1	D1	67,50	cm
2	D2	64,80	cm
3	Fließmaß	66,15	cm
4	T ₅₀₀	5	sec

Lfd.Nr.	Rohdichte und Luftgehalt		
[A]	[B]	[C]	[D]
1	Rohdichte	2453	kg/m ³
2	Luftgehalt	2,50	%

Tabelle 9 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen



Setzfließmaß-Hägermann



Setzfließmaß-Abrams

Abbildung 79 Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur

5.6.3.2 Festbetonprüfungen

Im Zuge der Festbetonprüfungen wurde die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit der Prüfkörper bestimmt. Des Weiteren wurde ebenso der E-Modul der Prüfzylinder ermittelt. Analog zu den Festbetonprüfungen der F 45-Rezeptur erfolgte die Festbetonprüfung der SCC-Rezeptur ebenfalls erst nach 34 Tagen

Ermittlung der Biegezugfestigkeit

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsuntersuchungen sind in Diagramm 7 dargestellt. Die maximale Biegezugfestigkeit bei einer Verformung von 1,0 mm wurde mit $20,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Die geringste Biegezugfestigkeit bei gleicher Verformung wurde mit $16,6 \text{ N/mm}^2$ gemessen.

Die mittlere Biegezugfestigkeit beträgt $18,3 \text{ N/mm}^2$.

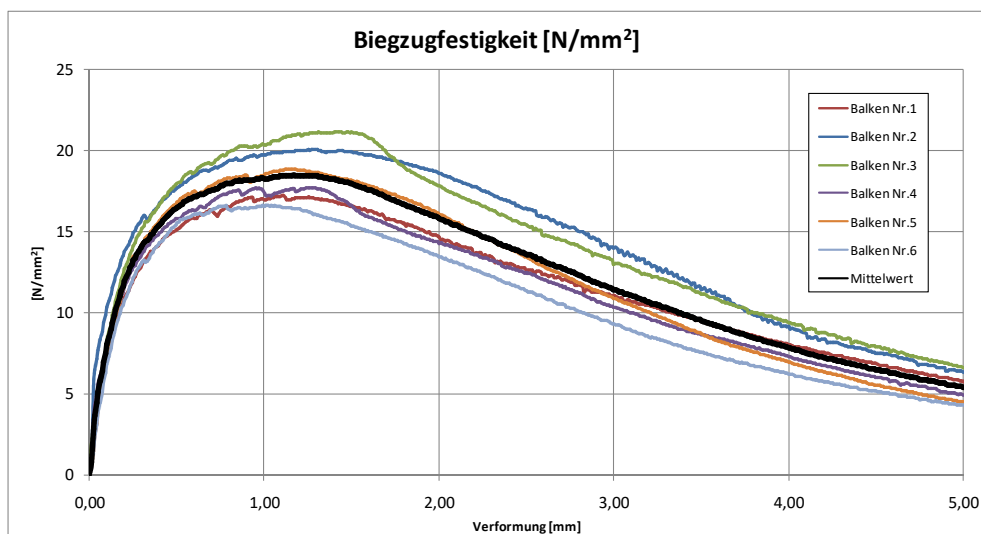


Diagramm 7 Biegezugfestigkeit SCC-Rezeptur - Teil 2

Die mittlere Biegezugfestigkeit bei einer Verformung von 1,0 mm der mit der SCC-Rezeptur hergestellten Prüfbalken aus dem zweiten Teil der

Mischversuche am Skako Rotoconix, übersteigt mit $18,3 \text{ N/mm}^2$ jene aus dem ersten Teil ($14,5 \text{ N/mm}^2$) um rund 27% (vergleiche Diagramm 1 und Diagramm 7). Der Fasergehalt belief sich in beiden Fällen bei 2,00 Vol.-%.

Des Weiteren zeigt der direkte Vergleich der Diagramme 1 und 7, dass die Schwankungen der Biegezugfestigkeiten im zweiten Teil der Mischversuche mit einem Variationskoeffizienten von 8,8 deutlich unter jenem aus dem ersten Teil liegen.

Sowohl die erhöhte mittlere Biegezugfestigkeit sowie der geringere Variationskoeffizient aus Teil zwei der Mischversuche sind ein Indikator für eine bessere Verteilung der Stahlfasern im Mischgut nach der Adaptierung des Skako Rotoconix Mixschers.

Ermittlung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

Die Versuchsergebnisse der E-Modul- und Druckfestigkeitsuntersuchungen sind in Diagramm 8 und Diagramm 9 dargestellt.

Als Mittelwert für den E-Modul konnte ein Wert von 46.320 N/mm^2 bestimmt werden. Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit beträgt $139,3 \text{ N/mm}^2$.

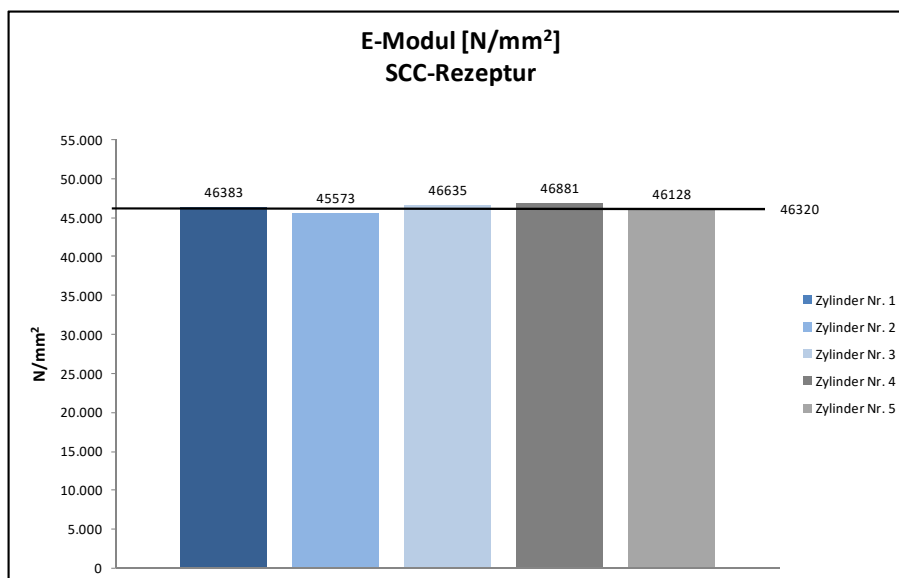


Diagramm 8 E-Modul der Zylinderproben

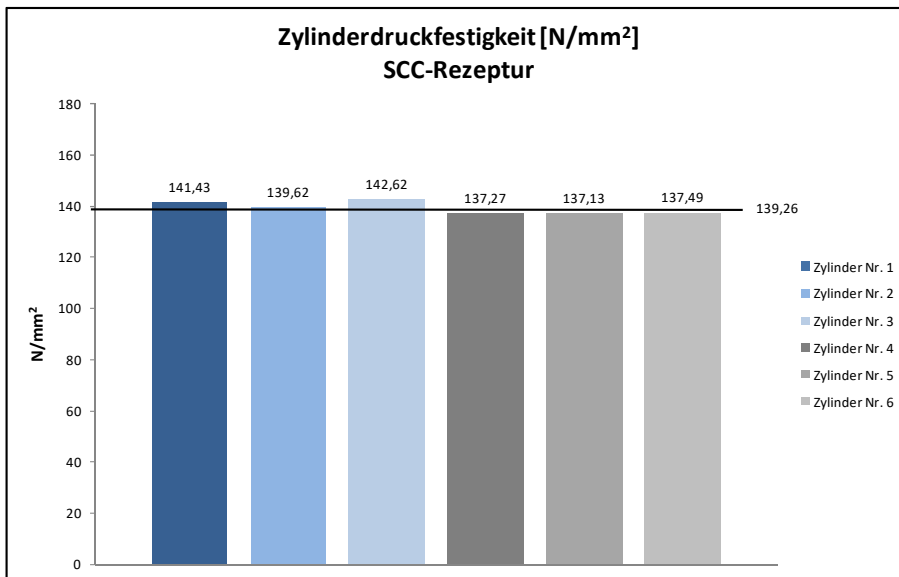


Diagramm 9 Druckfestigkeit der Zylinderproben

5.6.4 Bindemittelsuspension

Wie bereits in den Kapiteln 5.6.2 und 5.6.3 beschrieben, erfolgte jeweils nach der ersten Mischphase eine visuelle Beurteilung der Bindemittelsuspension, in der die Suspension auf sichtbare Agglomerate untersucht wurde.



Abbildung 80 Visuelle Beurteilung der Suspension

Da im Anschluss an die Verflüssigung nach wie vor kleine Agglomerate im Größenbereich von 0,1-1 mm in der Suspension auszumachen waren, ist aus Abbildung 80 zu entnehmen, dass die für die Herstellung der Bindemittelsuspension verwendete Werkzeuggeschwindigkeit des Wirblers (6,4 m/s bzw. 203 U/min) für eine vollständige Auflösung der Agglomerate zu gering war.

Um auch diese kleinen Partikelzusammenschlüsse vollständig aufzulösen wäre demnach eine Steigerung der Werkzeuggeschwindigkeit und die Verwendung eines auf die feinen Feststoffpartikel abgestimmten

Mischwerkzeug erforderlich. Die Ausbildung der feinen Agglomerate kann aber auch auf das Fehlen von größeren Partikeln in der Bindemittelsuspension zurückgeführt werden. Größere Partikel verursachen durch ihre Bewegungen im Mischgut ein Aufschlagen der Agglomerate und somit eine Zerstörung derselben.

5.7 Mischversuche Kniele KKM Konusmischer

Die Mischversuche am Kniele KKM Konusmischer wurden im Fertigteilwerk der Firma Wilhelm+Mayer Bau GmbH in Klaus – Vorarlberg durchgeführt.

Hierzu wurden die im Vorfeld trockengemischten „Bindemittel-Feinkorn-Big-Bags“ sowie die in Lille bei der Firma Skako gemischten „Stahlfaser-Grobkorn-Big Bags“ nach Klaus versandt und dort bis zum Versuchsstart trocken zwischengelagert.

Als Mischer wurde ein Kniele KKM Konusmischer 500/750 verwendet, der wie der Skako Rotoconix-Mischer über eine maximale Füllmenge von 500 Liter Frischbeton verfügt. Die maximale Motorleistung des inneren Rührwerks sowie der beweglichen Randabstreifer betrug beim getesteten KKM Konusmischer 15 kW.

Abbildung 81 zeigt den im Fertigteilwerk der Firma Wilhelm+Mayer Bau GmbH installierten KKM Konusmischer.



Abbildung 81 Kniele KKM Konusmischer der Firma Wilhelm+Mayer Bau GmbH

5.7.1 Nassmischen der SCC-Rezeptur

Bevor mit dem eigentlichen Nassmischprozess begonnen wurde, wurden die „Grobkorn-Big-Bags“ einer augenscheinlichen Qualitätskontrolle hinsichtlich der Faserverteilung unterzogen (siehe Abbildung 82).

Hierbei wurde festgestellt, dass sich die rund vier Wochen vorher eingemischten Stahlfasern trotz des Transports von Lille nach Klaus (900 km) im „Grobkorn-Big-Bag“ nicht absetzen und die „Stahlfaser-Grobkorn-Premix“ eine hohe Homogenität aufwies (siehe auch Kapitel 5.6.1).



Abbildung 82 Blick in den „Stahlfaser-Grobkorn-Big-Bag“

Für das Nassmischen der SCC-Rezeptur wurde zu Beginn der Mischer mit dem „Bindemittel-Feinkorn-Big-Bag“ beschickt.

Analog zu den Mischversuchen beim Skako Rotoconix konnte auch bei den Mischversuchen am KKM Konusmischer festgestellt werden, dass durch die doppelte Big-Bag-Auskleidung sowie durch den schmalen Entleerstützen an der Big-Bag-Unterseite die Big-Bag-Entleerung äußerst mühevoll und sehr zeitintensiv verlief. Bedingt durch die langsame Entleerung des Big-Bags betrug die Entleerzeit der „Bindemittel-Premix“ sieben Minuten.

Nach dem Einfüllen der „Bindemittel-Premix“ wurde umgehend die Wasser- und Fließmittelzugabe gestartet. Das Anmachwasser wurde hierbei über die Dosieranlage des Mixers zugegeben. Das Fließmittel und der Erstarrungsverzögerer wurden per Hand bzw. mittels Kübel und Trichter in den Mischer eingebracht.

Mit Beginn der Wasser- und Fließmittelzugabe betrug die Leistungsaufnahme des Inneren Rührwerkzeugs und des Abstreifers jeweils 3 kW.

Der Übergang vom trockenen Bindemittel-Kornhaufwerk zu einem feuchten Kornhaufwerk bzw. in eine Suspension ging mit einer Erhöhung der Leistungsaufnahme des Mischwerkzeugs einher.

Das innere Rührwerk erreichte bei gleichbleibender Rotationsgeschwindigkeit eine Leistungsaufnahme von bis zu 5,8 kW. Mit dem Übergang zur Suspension fiel die Leistung des inneren Rührwerks auf 3,6 und die des Randabstreifers auf 0,9 kW ab.

Der Übergang vom Kornhaufwerk zur Suspension startete eine Minute nach dem Ende der Wasser- und Fließmittelzugabe. Eine komplette Verflüssigung stellte sich nach einer Mischzeit von ca. fünf Minuten ein.

Aufgrund eines Sicherheitsmechanismus musste der Mischer für die Beschickung mit der „Grobkorn-Premix“ für vier Minuten angehalten

werden. Anschließend wurde der Mischprozess fortgesetzt und die „Grobkorn-Premix“ in den Bindemittelleim eingemischt.

Die Leistungsaufnahme des Motors für das innere Rührwerk stieg dabei von anfänglichen 6,9 kW auf einen maximalen Wert von 10,6 kW an. Die Leistungsaufnahme des Abstreifers belief sich wie bei der Herstellung des Bindemittelleims auf 3 kW.

Bedingt durch die hohe Viskosität des Frischbetons reichte das maximale Drehmoment des 15 kW Motors nicht aus, um den Mischprozess aufrecht zu erhalten, sodass es wie beim ersten Mischversuch am Skako Rotoconix zum Stillstand des Werkzeugmotors kam.

Während jedoch beim Skako Rotoconix der Mischprozess trotz des Ausfalls des Hochgeschwindigkeitswirblers mit der Zwei-Wege-Schnecke und durch die Trogrotation aufrecht erhalten werden konnte, kam es beim Kniele KKM-Konusmischer durch den Motorausfall des Inneren Rührwerkzeugs zu einem Totalstillstand des Mixers.

Nach einer 23-minütigen Stillstandsphase in der vom anwesenden Personal erfolglos versucht wurde, den Mischprozess wieder zu starten, musste der Mischer entleert werden.

Bei der Entleerung wies der nicht fertiggemischte Beton vor allem im bodennahen Bereich des Mixers eine äußerst trockene Konsistenz auf.

So trat der Beton vor allem im ersten Drittel der Entleerung nicht kontinuierlich sondern klumpenweise aus dem Mischer aus.

Der gesamte Mischprozess ist nachfolgend bildhaft dargestellt:



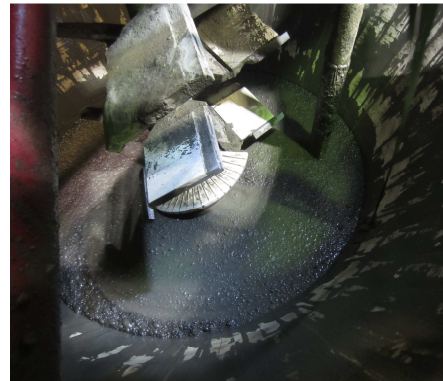
Mischerbeschickung mit der „Bindemittel-Premix“



Herstellung der Bindemittelsuspension



Fertiger Bindemittelleim



Sichtbare Agglomerate und Luftblasen im Bindemittelleim



Zugabe der „Stahlfaser-Grobkorn-Premix“



Einmischen der „Stahlfaser-Grobkorn-Premix“ in den Bindemittelleim



Motorstop des Mixers aufgrund der zu hohen Viskosität des Frischbetons



„Klumpenweise“ Entleerung des nicht fertigmischten Frischbetons

Abbildung 83 Mischprozess der SCC- Rezeptur am KKM-Konusmischer

Bedingt durch den unvollständigen Mischprozess konnte der entleerte Beton nicht für aussagekräftige Frisch- und Festbetonprüfungen verwendet werden und wurde daher entsorgt.



Abbildung 84 Kontrolle der "Frischbetoneigenschaften"

5.7.2 Nassmischen der F45-Rezeptur

Aufgrund des Ausfalls des Antriebsmotors für das Innere Rührwerk, wurde analog zu den ersten Mischversuchen am Skako Rotoconix-Mischer auf das Nassmischen der F 45-Rezeptur verzichtet.

5.8 Mischversuche MAT-Gegenstrom-Intensivmischer

Die Mischversuche am MAT-Gegenstrom-Intensivmischer wurden in den Räumlichkeiten des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau an der Technischen Universität Graz durchgeführt. Hierbei wurde in zwei Versuchsdurchführungen (M1 und M2) jeweils die SCC-Rezeptur gemischt.

Anders als bei den beiden Mischermodellen von Skako und Kniele handelt es sich beim MAT-Gegenstrom-Intensivmischer um einen reinen Suspensionsmischer zur Herstellung von Bindemittelleimen, Mörtel und Feinkornbetonen (siehe Kapitel 5.3.3). Des Weiteren beträgt das Fassungsvermögen des MAT-Gegenstrom-Intensivmischers mit 50 Litern Frischbeton lediglich 10% des Fassungsvermögens der bereits getesteten Mischer.

Bedingt durch die besondere Arbeitsweise (Ausbildung eines Flüssigkeitsstroms zwischen der oberen Vormischzone und der unteren Intensivmischzone) verlangt der MAT-Gegenstrom-Intensivmischer, dass zu Beginn 80 - 100 % der Flüssigkeiten und erst nachfolgend die pulverförmigen Feststoffpartikel in den Mischer eingebracht werden.

Aus diesem Grund wurde für die Versuchsdurchführung folgendes Mischregime bestimmt:

- Zugabe des Anmachwassers und der Betonzusatzmittel (Fließmittel + Erstarrungsverzögerer)
- Zugabe Zement

- Zugabe Quarzmehl
- Zugabe Mikrosilica
- Zugabe Quarzpulver
- Zugabe Quarzsand
- Zugabe Stahlfasern
- Zugabe Entschäumer

Anders als bei den Versuchen mit dem Skako Rotoconix und dem Kniele KKM-Konsumischer wurden bei den Mischversuchen mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer keine Premixe verwendet, sondern dieselben Feststoffpartikel separat in den mit dem Anmachwasser und den Betonzusatzmitteln beschickten Mischer eingebracht.

Das Einbringen der Feststoffpartikel erfolgte dahingehend, dass sämtliche festen Betonausgangsstoffe nicht schlagartig eingefüllt sondern kontinuierlich in den vom Mischer erzeugten Flüssigkeitsstrom "eingerieselt" wurden. Der Grund für diese kontinuierliche Zugabe liegt darin, dass dadurch der Flüssigkeitsstrom über den gesamten Mischprozess aufrechterhalten wird und die Feststoffpartikel so am schnellsten dispergiert werden.



Abbildung 85 Beschickung des Mischers mit den Feststoffpartikeln

Durch den Eintrag der Feststoffpartikel in den Flüssigkeitsstrom sind die Widerstandskräfte des Mischguts im MAT-Gegenstrom-Intensivmischer im Vergleich zu den Widerstandskräften in den anderen getesteten Mischertypen deutlich geringer. Dadurch konnte der MAT-Gegenstrom-Intensivmischer bei einem niedrigeren Energieverbrauch (5,4 kW) mit höheren Drehzahlen betrieben werden (max. 669 U/min. bzw. 7,9 m/s).

Durch die kontinuierliche Zugabe der Feststoffpartikel und der Stahlfasern entsprach die Gesamtmischzeit am MAT-Gegenstrom-Intensivmischer im Grunde der Summe der einzelnen Dosierzeiten. Die Gesamtmischzeit für die beiden SCC-Rezepturen betrug 15 bzw. 19 Minuten, wobei die Fasern erst zum Schluss des Mischprozesses sieben Minuten lang eingestreut wurden.

5.8.1 Bindemittelsuspension

Analog zu den Mischversuchen am Skako Rotoconix bzw. am Kniele KKM-Konsumischer wurde auch die mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer hergestellte Bindemittelsuspension einer visuellen Beurteilung unterzogen.

Im Gegensatz zu den anderen Bindemittelsuspensionen wies die mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer gemischte Bindemittelsuspension keine sichtbaren Agglomerate oder sonstige Partikelzusammenschlüsse auf. Der Grund für die vollkommen homogen erscheinende Suspension liegt im kolloidalen Aufschluss sämtlicher Partikel durch die hohen Drehzahlen und dem besonderen Mischprinzip des MAT-Gegenstrom-Intensivmischers.

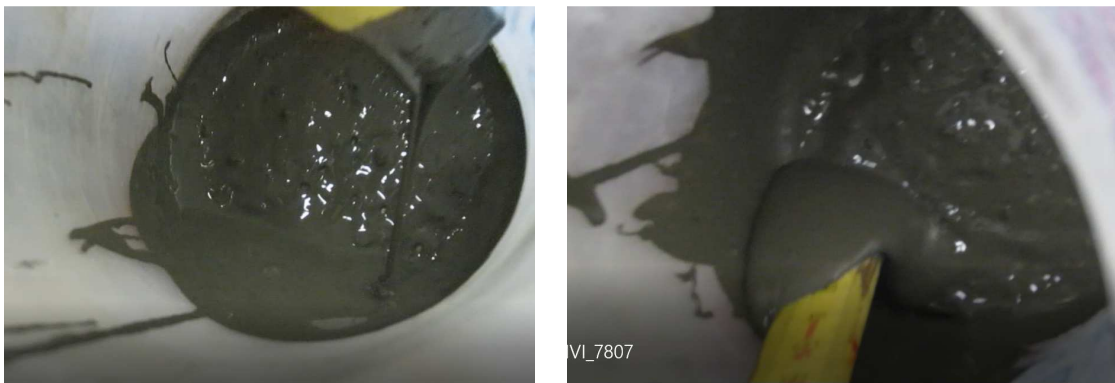


Abbildung 86 Visuelle Beurteilung der Bindemittelsuspension

5.8.2 Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur_M1

Im Anschluss an die Entleerung des Mixers erfolgten die Frischbetonprüfungen

Die Frischbetontemperatur wurde unmittelbar vor der Entleerung des Betons bestimmt und betrug 28°C.

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt:

Lfd.Nr.	Setzfließmaß Hägermanntrichter		
[A]	[B]	[C]	[D]
1	D1	31,30	cm
2	D2	32,00	cm
3	Fließmaß	31,65	cm

Lfd.Nr.	Setzfließmaß Abramstrichter		
[A]	[B]	[C]	[D]
1	D1	97,00	cm
2	D2	88,00	cm
3	Fließmaß	92,50	cm
4	T ₅₀₀	5	sec

Lfd.Nr.	Rohdichte und Luftgehalt		
[A]	[B]	[C]	[D]
1	Rohdichte	2371	kg/m ³
2	Luftgehalt	-	%

Tabelle 10 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur M_1

Bedingt durch Probleme mit dem Luftporentopf während der Durchführung der Frischbetonprüfungen konnte kein Luftgehalt ermittelt werden.

Im Zuge der Frischbetonprüfungen fiel auf, dass die Stahlfasern im Frischbeton sehr ungleichmäßig verteilt waren und eine erhöhte "Igelbildung" auftrat.

Der Grund hierfür liegt vermutlich an der schmalen Entleeröffnung des Mixers. Während des Entleerprozesses kam es hier zu einem Anammeln der Stahlfasern, die sich durch den Entleerstrom immer stärker ineinander "verkeilten" und schließlich als Faserigel austraten.



Abbildung 87 Entleerung

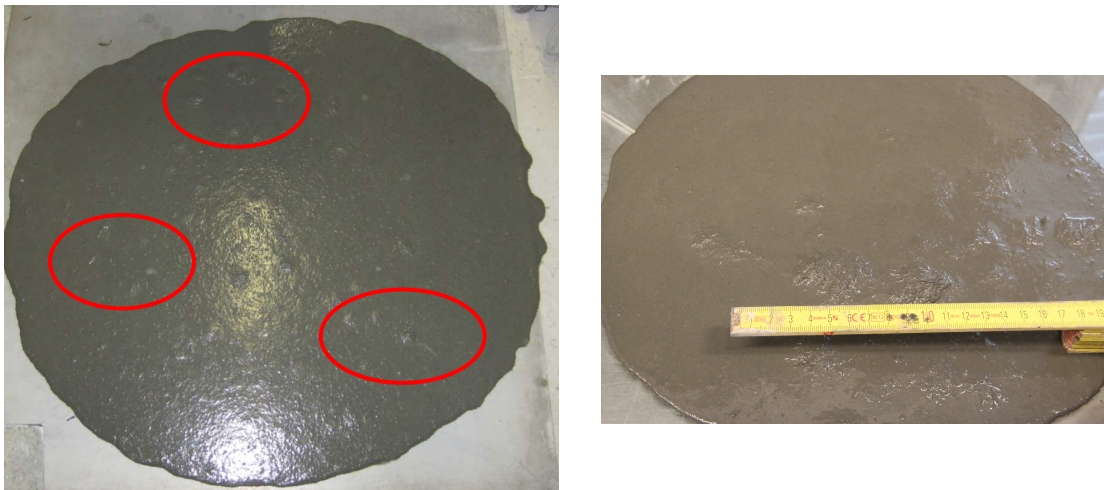


Abbildung 88 Ungleichmäßige Faserverteilung und erhöhte Igelbildung

Im Vergleich zum Skako Rotoconix (25,25 cm bzw. 66,15 cm) wurde mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer (31,65 cm bzw. 92,50 cm) ein deutlich höheres Fließmaß erreicht. Die Ursache für diesen großen Unterschied liegt einerseits in der hohen Drehzahl des MAT-Gegenstrom-Intensivmischers und andererseits im Mischprinzip des MAT-Gegenstrom-Intensivmischers.

Die hohen Drehgeschwindigkeiten in Verbindung mit den durch die beiden separaten Mischzonen erzeugten Flüssigkeitsstrom führt dazu dass die einzelnen Partikel schnell und weitläufig im Mischbehälter verteilt und rundum mit Flüssigkeit benetzt werden. Durch die horizontal ausgerichteten perforierten Mischwerkzeuge wird das Mischgut auch stark geschert, wodurch Partikelkonzentrationen kolloidal aufgeschlossen werden

Aufgrund des hohen Fließmaßes der ersten SCC-Mischung wurde eine zweite SCC-Mischung mit reduziertem Wassergehalt (-1 Liter; entspricht einer Wassereinsparung von 11%) gemischt. Der W/B-Wert reduzierte sich dementsprechend von 0,24 auf 0,22.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der zweiten SCC-Mischung dargestellt:

5.8.3 Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur_M2

Setzfließmaß Hägermanntrichter			
Lfd.Nr.	[B]	[C]	[D]
1	D1	29,00	cm
2	D2	27,50	cm
3	Fließmaß	28,25	cm

Setzfließmaß Abramstrichter			
Lfd.Nr.	[B]	[C]	[D]
1	D1	78,00	cm
2	D2	78,00	cm
3	Fließmaß	78,00	cm
4	T ₅₀₀	5	sec

Rohdichte und Luftgehalt			
Lfd.Nr.	[B]	[C]	[D]
1	Rohdichte	2451	kg/m ³
2	Luftgehalt	3,30	%

Tabelle 11 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der SCC-Rezeptur M_2

Durch den verminderten W/B-Wert in der zweiten Mischung reduzierte sich das Setzfließmaß mit dem Hägermanntrichter um 11% bzw. das Setzfließmaß mit dem Abramstrichter um 16%.

Trotz der Reduktion des W/B-Wertes sind die ermittelten Ausbreitmaße der mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer hergestellten SCC-Mischung im Vergleich zu den mit dem Skako Rotoconix erzeugten SCC-Mischungen deutlich höher.

5.8.4 Festbetonprüfungen SCC-Rezeptur_M1

Im Zuge der Festbetonprüfungen wurden die Prüfkörper auf die maximale Druckfestigkeit untersucht. Des Weiteren wurde ebenso der E-Modul der Prüfsylinder ermittelt. Die Festbetonprüfungen erfolgten 28 Tage nach der Herstellung der Probekörper.

Ermittlung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

Der E-Modul und die Druckfestigkeit wurden anhand von drei Zylinderproben (100 x 200 mm) ermittelt. Die Versuchsergebnisse sind in Diagramm 10 und Diagramm 11 dargestellt.

Als Mittelwert für den E-Modul konnte ein Wert von 45.518 N/mm² bestimmt werden. Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit beträgt 137,5 N/mm².

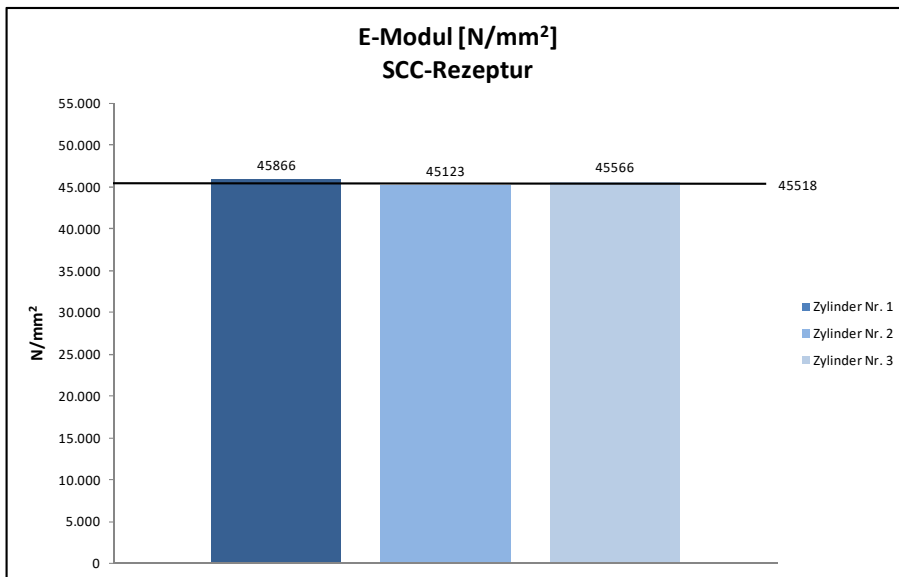


Diagramm 10 E-Modul der Zylinderproben der SCC-Rezeptur_M1

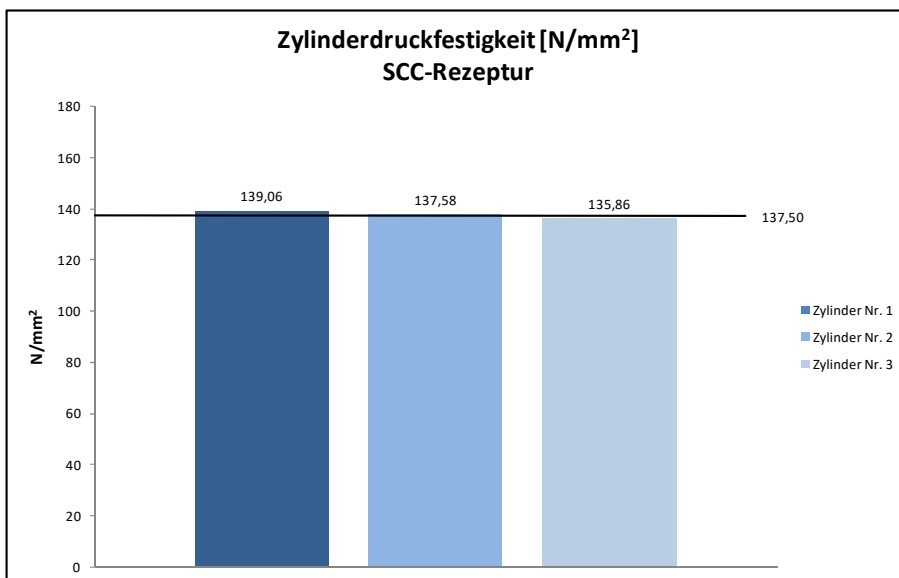


Diagramm 11 Druckfestigkeit der Zylinderproben der SCC-Rezeptur_M1

5.8.5 Festbetonprüfungen SCC-Rezeptur_M2

Durch die Reduktion des W/B-Wertes von 0,24 auf 0,22 erhöhte sich sowohl der E-Modul als auch die maximale Druckfestigkeit der Betonproben.

Die Versuchsergebnisse der E-Modul- und Druckfestigkeitsuntersuchungen sind in Diagramm 12 und Diagramm 13 dargestellt.

Als Mittelwert für den E-Modul konnte ein Wert von 50.428 N/mm² bestimmt werden. Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit beträgt 158,4 N/mm².

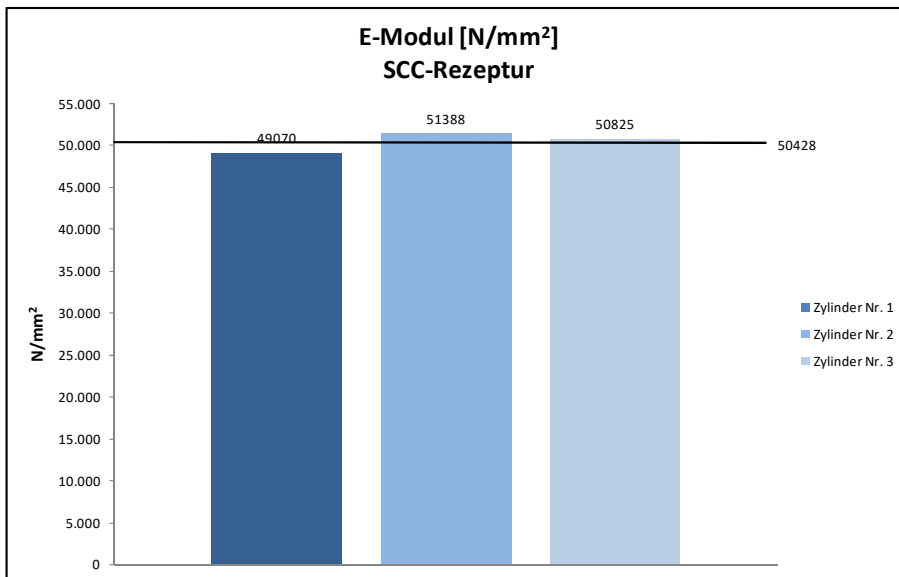


Diagramm 12 E-Modul der Zylinderproben SCC-Rezeptur_M2

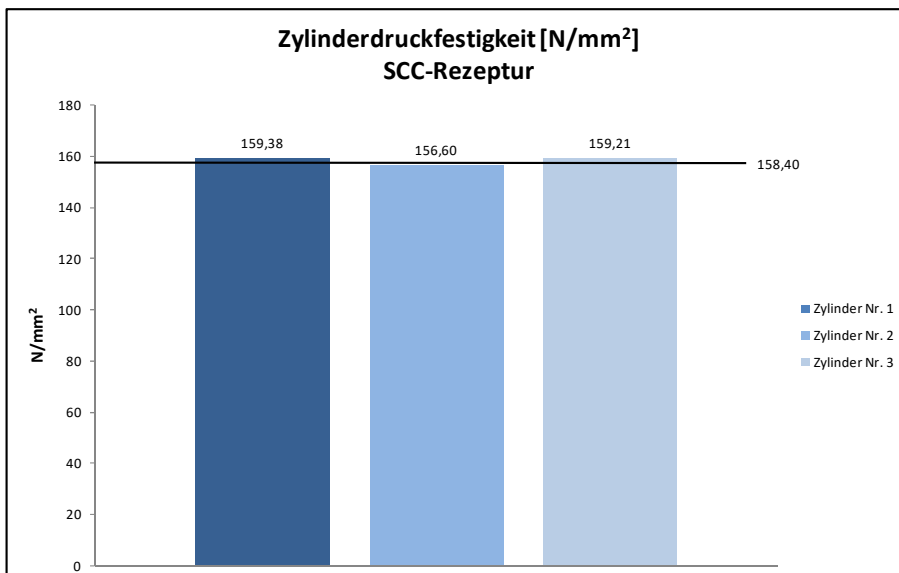


Diagramm 13 Druckfestigkeit der Zylinderproben SCC-Rezeptur_M2

5.9 Zweistufiger Mischprozess durch die Kombination unterschiedlicher Mischer

Aufgrund der hohen Qualität der vom MAT-Gegenstrom-Intensivmischer erzeugten Bindemittelsuspension, wurde in einem weiteren Mischversuch der Einfluss eines zweistufigen Mischprozesses mit zwei unterschiedlichen Mischertypen näher untersucht.

In diesem zweistufigen Verfahren wurde im ersten Schritt die Bindemittelsuspension mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer hergestellt. Nach der Entleerung der Suspension wurde diese in einen Eirich R09-Intensivmischer mit einem Fassungsvermögen von 100 Litern gefüllt und

in einem zweiten Schritt das Einmischen der Grobkornzuschläge und der Stahlfasern durchgeführt.

Analog zu den Mischversuchen am Skako Rotoconix wurden hier ebenfalls jeweils eine Charge der SCC und eine Charge der F 45-Rezeptur hergestellt. Für den zweistufigen Mischprozess wurden beide Rezepturen dahingehend angepasst, dass sich der Suspensionsanteil in den UHPC-Rezepturen auf 50 Litern belief und somit eine Vollfüllung des MAT-Gegenstrom-Intensivmischers erreicht wurde. Durch die Zugabe der Grobkornzuschläge ergab sich eine Frischbetongesamtmenge von 89,7 (SCC) und 90,9 (F-45) Litern.

Um Aufschluss über die Qualität der Bindemittelsuspension zu erhalten, wurden des Weiteren sowohl Prüfungen an der frischen als auch an der erhärteten Suspension durchgeführt.

5.9.1 Nassmischen der SCC-Rezeptur

Die erste Stufe des zweistufigen Mischprozesses (Herstellen der Bindemittelsuspension) gliederte sich wie folgt:

- Zugabe des Anmachwassers und der Betonzusatzmittel (Fließmittel + Erstarrungsverzögerer)
- Zugabe Zement
- Zugabe Quarzmehl
- Zugabe Mikrosilica

Da hohe Drehgeschwindigkeiten zu Beginn dazu führten, dass das Anmachwasser aus dem Mischtrog spritze, musste die Drehgeschwindigkeit Anfangs auf 3,4 m/s (285 U/min) begrenzt werden. Erst nach der Zugabe der Feststoffpartikel konnte die Drehzahl schrittweise auf die maximale Drehzahl (7,9 m/s bzw. 670 U/min) gesteigert werden.

Nach der Zugabe sämtlicher Feststoffpartikel (Dauer ca. 3 min) wurde die Suspension noch rund eine Minute bei maximaler Drehzahl durchgemischt und nach vier Minuten mit der Entleerung begonnen.



Abbildung 89 Herstellen der Bindemittelsuspension-Blick in den Mischertrog (links) und Entleerung der Bindemittelsuspension (rechts)

Nach dem Einfüllen der Bindemittelsuspension in den Eirich-Intensivmischer wurde mit dem Einmischen der Grobkornzuschläge und der Stahlfasern gestartet. Die Werkzeuggeschwindigkeit des Stiftenwirlers während des Zugabeprozesses betrug 150 U/min. Die Zugabereihenfolge gliederte sich wie folgt:

- Zugabe Quarzpulver
- Zugabe Quarzsand
- Zugabe Stahlfasern
- Zugabe Entschäumer



Abbildung 90 Beschickung des Eirich-Intensivmischers mit der Bindemittelsuspension (links) und mit den Grobkornzuschlägen (rechts)

Während die Zugabe der Feststoffpartikel in die Bindemittelsuspension schlagartig erfolgte, mussten die Stahlfasern (um Faserkonzentrationen bzw. eine Igelbildung zu vermeiden) sukzessive eingerieselt werden.

Bedingt durch den zweistufigen Mischprozess und der damit verbundenen dreiminütigen Entleerung der Bindemittelsuspension sowie der dreiminütigen Beschickung des Eirich-Intensivmischers und der rund sechs Minuten dauernden Stahlfaserzugabe, ergab sich trotz rascher Zugabe der Feststoffpartikel eine Gesamtmischzeit von 23 bzw. eine effektive Mischzeit von 16 min.

5.9.1.1 Frischbetonprüfungen SCC-Rezeptur

Im Anschluss an die Entleerung des Mixers folgten die Frischbetonprüfungen.

Die Frischbetontemperatur wurde unmittelbar vor der Entleerung des Betons bestimmt und betrug 26,3°C.

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt:

Setzfließmaß Hägermanntrichter				
Lfd.Nr.	[A]	[B]	[C]	[D]
1	D1	26,00	cm	
2	D2	26,00	cm	
3	Fließmaß	26,00	cm	

Setzfließmaß Abramstrichter				
Lfd.Nr.	[A]	[B]	[C]	[D]
1	D1	78,50	cm	
2	D2	74,50	cm	
3	Fließmaß	76,50	cm	
4	T ₅₀₀	5	sec	

Rohdichte und Luftgehalt				
Lfd.Nr.	[A]	[B]	[C]	[D]
1	Rohdichte	2478	kg/m ³	
2	Luftgehalt	1,80	%	

Tabelle 12 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der SCC-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess

5.9.1.2 Festbetonprüfungen SCC-Rezeptur

Im Zuge der Festbetonprüfungen wurde die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit der Prüfkörper bestimmt. Des Weiteren wurde ebenso der E-Modul der Prüfsylinder ermittelt. Die Festbetonprüfungen erfolgten 28 Tage nach der Herstellung der Probekörper.

Ermittlung der Biegezugfestigkeit

Für die Untersuchung der Biegezugfestigkeit wurden sechs Prüfbalken mit den Abmessungen 150 x 150 x 700 mm geprüft. Die Ergebnisse sind in Diagramm 15 dargestellt. Die maximale Biegezugfestigkeit bei einer Verformung von 1,0 mm wurde mit 20,9 N/mm² ermittelt. Die geringste Biegezugfestigkeit bei gleicher Verformung wurde mit 17,2 N/mm² gemessen.

Die mittlere Biegezugfestigkeit beträgt 18,4 N/mm².

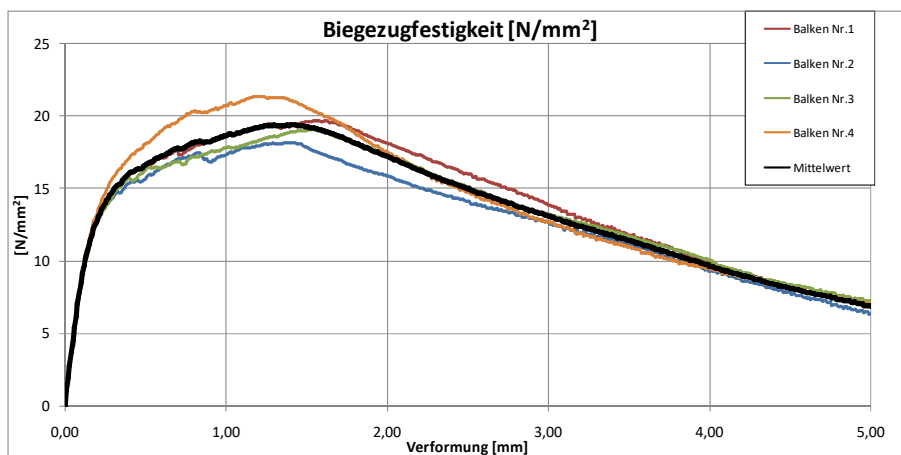


Diagramm 14 Biegezugfestigkeit SCC-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess

Ermittlung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

Der E-Modul und die Druckfestigkeit wurden anhand von sechs Zylinderproben (100 x 200 mm) ermittelt. Die Versuchsergebnisse der sind in Diagramm 16 und Diagramm 17 dargestellt.

Als Mittelwert für den E-Modul konnte ein Wert von 44.660 N/mm^2 bestimmt werden. Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit beträgt $142,5 \text{ N/mm}^2$.

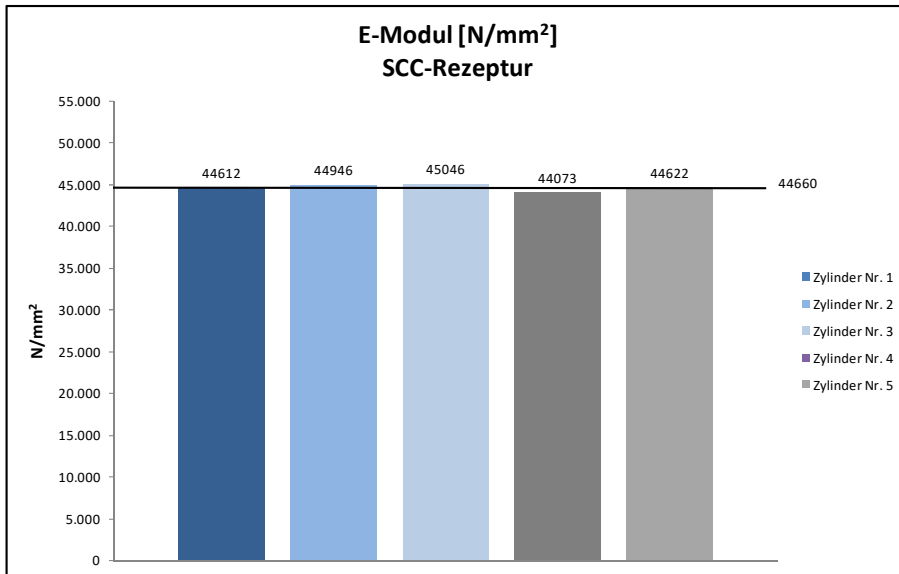


Diagramm 15 E-Modul der Zylinderproben der SCC-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess

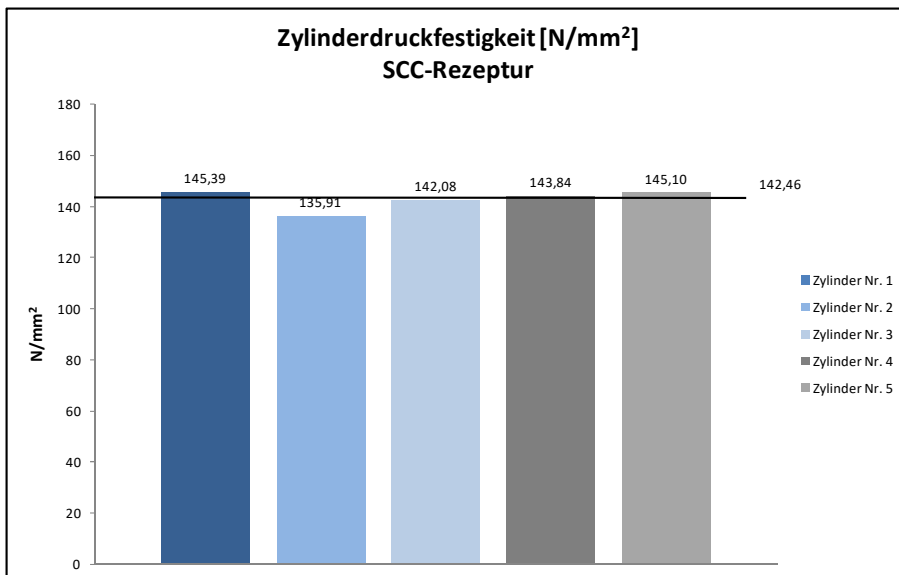


Diagramm 16 Druckfestigkeit der Zylinderproben der SCC-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess

5.9.2 Nassmischen der F-45-Rezeptur

Der zweistufige Mischprozess wurde ebenso mit der F-45 Rezeptur durchgeführt.

Der Mischablauf sowie die Zugabereihenfolge der Betonausgangsstoffe erfolgten analog zum SCC-Mischprozess.

Für die Herstellung der Bindemittelsuspension belief sich die Mischzeit auf ca. vier Minuten. Für den gesamten zweistufige Mischprozess wurde eine Gesamtmischzeit von 21 bzw. eine effektive Mischzeit von 15 Minuten erreicht.

5.9.2.1 Frischbetonprüfungen F 45-Rezeptur

Im Anschluss an die Entleerung des Mischers folgten die Frischbetonprüfungen.

Die Frischbetontemperatur wurde unmittelbar vor der Entleerung des Betons bestimmt und betrug 25,7°C.

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt:

Lfd.Nr. Setzfließmaß Hägermanntrichter			
[A]	[B]	[C]	[D]
1	D1	23,80	cm
2	D2	23,80	cm
3	Fließmaß	23,80	cm

Lfd.Nr. Setzfließmaß Abramstrichter			
[A]	[B]	[C]	[D]
1	D1	53,00	cm
2	D2	56,00	cm
3	Fließmaß	54,50	cm
4	T ₅₀₀	7	sec

Lfd.Nr. Rohdichte und Luftgehalt			
[A]	[B]	[C]	[D]
1	Rohdichte	2515	kg/m ³
2	Luftgehalt	1,60	%

Tabelle 13 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der F 45-Rezeptur

5.9.2.2 Festbetonprüfungen F 45-Rezeptur

Im Zuge der Festbetonprüfungen wurde die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit der Prüfkörper bestimmt. Des Weiteren wurde ebenso der E-Modul der Prüfzylinder ermittelt.

Ermittlung der Biegezugfestigkeit

Für die Untersuchung der Biegezugfestigkeit wurden sechs Prüfbalken mit den Abmessungen 150 x 150 x 700 mm geprüft. Die Ergebnisse sind in Diagramm 17 dargestellt. Die maximale Biegezugfestigkeit bei einer Verformung von 1,0 mm wurde mit 16,6 N/mm² ermittelt. Die geringste Biegezugfestigkeit bei gleicher Verformung wurde mit 10,2 N/mm² gemessen.

Die mittlere Biegezugfestigkeit beträgt 13,4 N/mm².

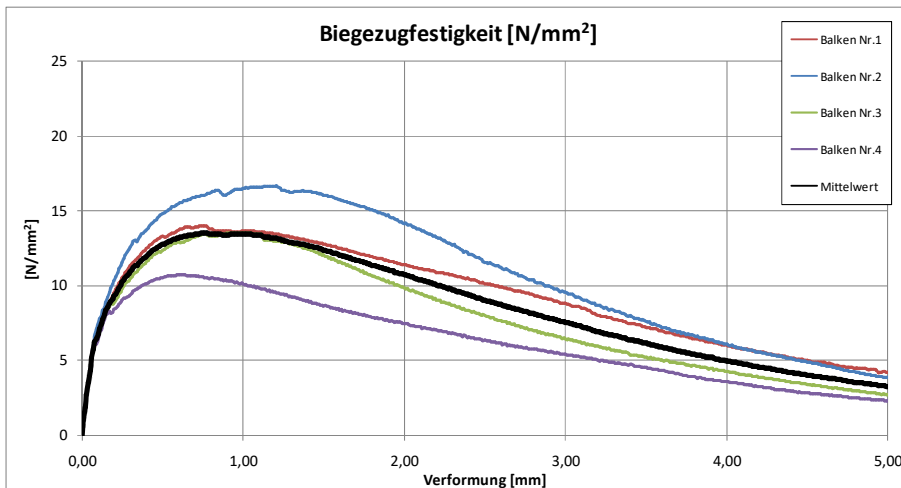


Diagramm 17 Biegezugfestigkeit F 45-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess

Ermittlung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

Der E- Modul und die Druckfestigkeit wurden anhand von sechs Zylinderproben (100 x 200 mm) ermittelt. Die Versuchsergebnisse sind in Diagramm 18 und Diagramm 19 dargestellt.

Als Mittelwert für den E-Modul konnte ein Wert von 44.321 N/mm^2 bestimmt werden. Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit beträgt $147,5 \text{ N/mm}^2$.

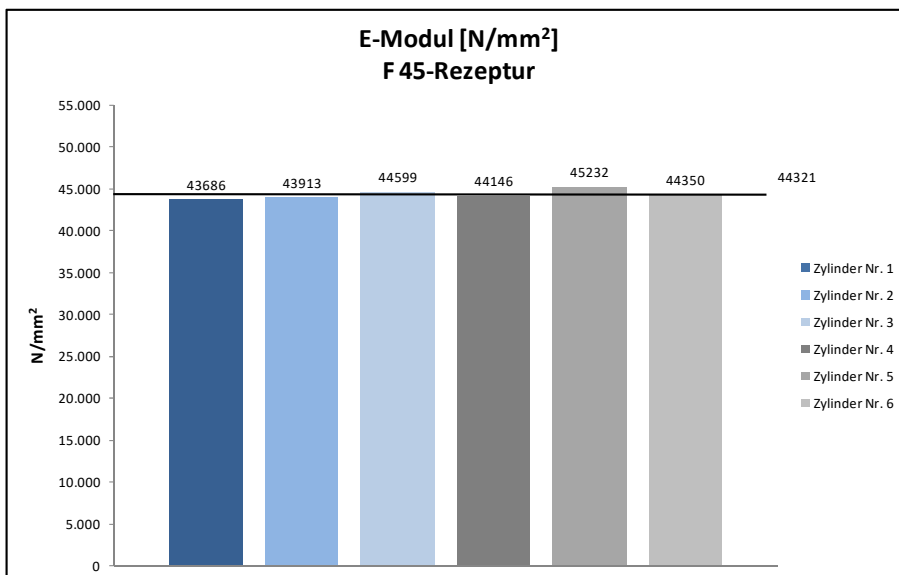


Diagramm 18 E-Modul der Zylinderproben der F 45-Rezeptur - zweistufiger Mischprozess

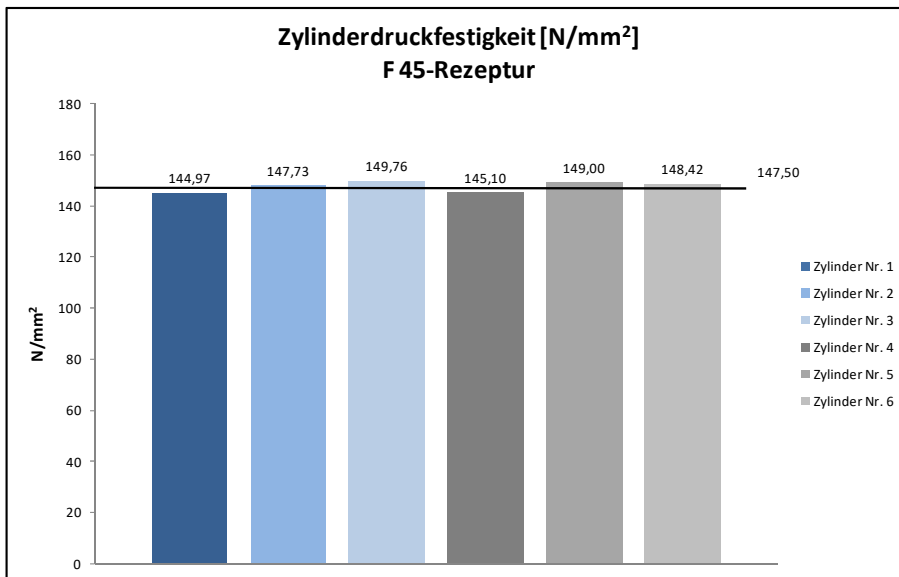


Diagramm 19 Druckfestigkeit der Zylinderproben der F 45-Rezeptur - zwei-stufiger Mischprozess

5.10 Mischen der Bindemittelsuspension

Um Aufschluss über die Qualität der Bindemittelsuspension zu erhalten, wurden zusätzlich zu den Frisch- und Festbetonprüfungen auch Prüfungen an der frischen sowie an der erhärteten Bindemittelsuspension durchgeführt. Hierzu wurden die Bindemittelsuspensionen für die SCC- und für die F-45 Rezeptur mit drei unterschiedlichen Mixchern hergestellt.

Die Überprüfung der frischen Bindemittelsuspension erfolgte hierbei einerseits durch eine visuelle Beurteilung sowie durch die Ermittlung der Fließgrenze mithilfe eines Prüfverfahrens aus der Bodenmechanik. Für die Überprüfung der erhärteten Bindemittelsuspension (Biegezug- und Druckfestigkeit) wurden jeweils sechs Probekörper (16 x 4 x 4 cm) der SCC- Suspension und sechs Probekörper mit der F-45 Suspension angefertigt.

5.10.1 Bindemittelsuspension – MAT-Gegenstrom-Intensivmischer

Im Zuge der in Kapitel 5.9 durchgeführten Mischversuche, wurde für eine Beurteilung der Suspensionsqualität zwei Liter Bindemittelsuspension aus dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer entnommen und im ersten Schritt einer visuellen Beurteilung unterzogen (Bestimmung von sichtbaren Partikelzusammenschlüssen).



Abbildung 91 Optische Beurteilung der Bindemittelsuspension

Analog zu der ebenfalls mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer hergestellten Bindemittelsuspension aus Kapitel 5.8 wies auch diese Suspension keine sichtbaren Partikelzusammenschlüsse auf und erschien vollkommen homogen.

Um die Mischqualität der Suspension auch quantifizieren zu können, erfolgte neben der optischen Beurteilung der Suspension auch die Bestimmung der Fließgrenze. Hierbei steht eine geringe Fließgrenze der Suspension dafür, dass während des Mischprozesses hohe Scherkräfte in das Mischgut bzw. in die Suspension eingebracht wurden und die einzelnen Partikel vollständig in der Suspension verteilt und allseits mit Flüssigkeit benetzt sind. Die Bestimmung der Fließgrenze wurde mit Hilfe einer Kugelharfe durchgeführt.

Die Kugelharfe ist ein Messgerät aus der Bodenmechanik und wird für die Ermittlung der Fließgrenze von Bentonitsuspensionen verwendet. Sie besteht aus einem Harfenständer und dem Harfengerät auf dem zehn nummerierte Kugeln aus Glas und Stahl mit unterschiedlichen Durchmessern angeordnet sind.

Zur Ermittlung der Fließgrenze werden die Kugeln des Harfengerätes mit Hilfe des Harfenständers in die Suspension (1 Liter) eingetaucht. Jeder Kugel ist dabei eine andere wirksame Fließgrenze zugeordnet, bei der sie in der Suspension in Schwebelage gehalten werden.

Kugeln deren zugeordnete Fließgrenze geringer ist als jene der Suspension schwimmen auf der Suspension. Kugeln deren zugeordnete Fließgrenze höher ist als jene der Suspension tauchen in die Suspension ein. Durch die Ermittlung jener Kugelnummer die gerade noch auf der Suspension schwimmt, kann bei gegebener Suspensionsdichte mit Hilfe einer Fließgrenzetafel die Fließgrenze der Suspension bestimmt werden.

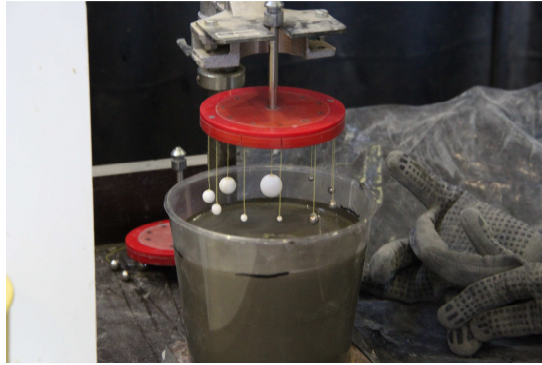


Abbildung 92 Kugelharfe kurz vor dem Eintauchen in die Bindemittelsuspension

5.10.2 Bindemittelsuspension – Eirich RV01-Labormischer

Als zweiter Mischer für die Herstellung der Bindemittelsuspension wurde der Eirich RV01-Labormischer der Technischen Universität Graz verwendet. Als Mischwerkzeug kam ein Stiftenwirbler zum Einsatz. Die Mischzeit der Suspension (drei Liter) wurde analog zu den Suspensionsversuchen mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer mit vier Minuten festgelegt. Die Werkzeuggeschwindigkeit belief sich während des gesamten Mischprozesses auf 500 U/min.



Abbildung 93 Eirich-Labormischer (links) und das verwendete Mischwerkzeug (rechts)

In der im Anschluss an die vierminütige Mischzeit durchgeführte visuelle Beurteilung der Suspensionsqualität konnten in sehr geringen Mengen Parikelzusammenschlüsse (≤ 1 mm) festgestellt werden.

Des Weiteren zeigte sich bei der Entleerung der Mischtrommel, dass sich in der Fuge zwischen Behälterboden und Behälterwand sowie an der Behälterwand selbst trockenes Mischgut ansammelte und nicht vom Mischwerkzeug in die Suspension eingemischt wurde. Als Grund hierfür konnte der verschlissene Randabstreifer, der das Mischgut im Randbereich der Trommel nicht vollständig dem Mischwerkzeug zuführte, ausgemacht werden.



Abbildung 94 Partikelzusammenschluss (links) und nicht eingemischtes Material (rechts)

5.10.3 Bindemittelsuspension – Ultra Turrax T50

Als dritter Mischer für die Suspensionstests wurde der Ultra Turrax T50 vom Institut für Bodenmechanik der Technischen Universität Graz verwendet. Bei diesem Mischer handelt es sich um ein Hochleistungs-Dispergiergerät, dass in der Bodenmechanik für die Aufschließung von Bentonitsuspensionen verwendet wird. Die maximale Drehzahl des Mischwerkzeugs beträgt 10.000 U/min.



Abbildung 95 Ultra Turrax T50 (links) und Mischwerkzeug (rechts)

Für die Suspensionsprüfungen wurden wie beim Eirich- Labormischer drei Liter der SCC-Suspension und drei Liter der F-45-Suspension hergestellt. Da der Ultra Turrax T 50 Mischer über keine Mischtrommel verfügte, wurden das Mischgut in einem Kübel gefüllt und das Mischwerkzeug in den Materialkübel "eingetaucht". Die Werkzeuggeschwindigkeit wurde über den Mischprozess sukzessive von 4000 auf 10000 U/min erhöht.

Bedingt durch den geringen Wirkungsradius des Mischwerkzeugs musste während des gesamten Mischprozesses das an der Kübelwand befindliche Material dem Mischwerkzeug händisch mit einer Spachtel zugeführt werden. Die Mischdauer verlängerte sich daher auf neun Minuten. Der ausgedehnte Mischprozess führte darüber hinaus zu einer Sus-

pensionstemperatur von 36,5°C wodurch sich rasch eine Haut auf der ruhenden Suspensionsoberfläche bildete.

Im Zuge der visuellen Beurteilung der Suspensionsqualität konnten trotz der hohen Werkzeuggeschwindigkeit mehrere Partikelzusammenschlüsse in der Suspension erkannt werden. Der Grund hierfür liegt im geringen Wirkungsradius des Mischwerkzeugs. Das für diesen Versuch zu kleine Mischwerkzeug konnte während des Mischprozesse nicht die gesamten Feststoffpartikel "erreichen" und diese somit nicht in der Flüssigkeit verteilen.

5.10.4 Ergebnisse der Suspensionstests

In den nachfolgenden Tabellen erfolgt die Gegenüberstellung der mittels der Kugelharfe ermittelten Fließgrenze der Suspensionen. Hierbei steht eine niedrige Fließgrenze für eine hohe Mischqualität.

SCC-Rezeptur								
Lfd.Nr.	Mischer	max. Drehzahl [U/min]	Mischzeit [min]	Suspensions-temperatur [°C]	Rohdichte [kg/m ³]	Kugelharfe Nr.	Fließgrenze [N/m ²]	Anmerkungen
[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[I]
1	MAT-Gegenstrom	670,0	4,0	25,8	1768,0	4	7,45	-
2	Eirich-Labor	500,0	4,0	25,1	1763,0	4	7,51	-
3	Ultra-Turrax-T50	10000,0	9,0	36,5	1764,0	4	7,50	mehrere sichtbare Partikelzusammenschlüsse

Tabelle 14 Fließgrenze der Bindemittelsuspension für die SCC-Rezeptur

F-45-Rezeptur								
Lfd.Nr.	Mischer	max. Drehzahl [U/min]	Mischzeit [min]	Suspensions-temperatur [°C]	Rohdichte [kg/m ³]	Kugelharfe Nr.	Fließgrenze [N/m ²]	Anmerkungen
[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[I]
1	MAT-Gegenstrom	670,0	4,0	24,0	1840,0	4	6,60	-
2	Eirich-Labor	500,0	4,0	25,4	1838,0	4	6,63	sehr wenige sichtbare Partikelzusammenschlüsse
3	Ultra-Turrax-T50	10000,0	9,0	35,5	1833,0	4	6,69	mehrere sichtbare Partikelzusammenschlüsse

Tabelle 15 Fließgrenze der Bindemittelsuspension für die F-45-Rezeptur

Die in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellten Fließgrenzen wurden mit Hilfe einer zur Kugelharfe zugehörigen Fließgrenzetafel, anhand der Rohdichte der Suspensionen und der Kugel, welche gerade noch auf der Suspension schwimmt bestimmt. Da bei allen Suspensionen die selbe Kugel auf der Suspension aufschwamm, und immer eine ähnliche Suspensionsrohddichte erreicht wurde, sind die Fließgrenzenunterschiede zwischen den Suspensionen jedoch vernachlässigbar gering. Während für die ermittelten Fließgrenzen beim MAT-Gegenstrom-Intensivmischer und dem Eirich-Labormischer eine Mischzeit von 4 Minuten ausreichte, musste beim Ultra-Turrax-T50 für eine ähnliche Fließgrenze die Mischzeit auf neun Minuten angehoben werden.

5.10.4.1 Druck- und Biegezugfestigkeiten der Suspensionen-MAT-Mischer

Die mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer erzeugten Suspensionen erreichen im Durchschnitt eine Druckfestigkeit von $118,0 \text{ N/mm}^2$ (SCC) bzw. $113,5 \text{ N/mm}^2$ (F 45). Die mittlere Biegezugfestigkeit erreichte $14,5 \text{ N/mm}^2$ (SCC) bzw. $7,4 \text{ N/mm}^2$ (F 45).

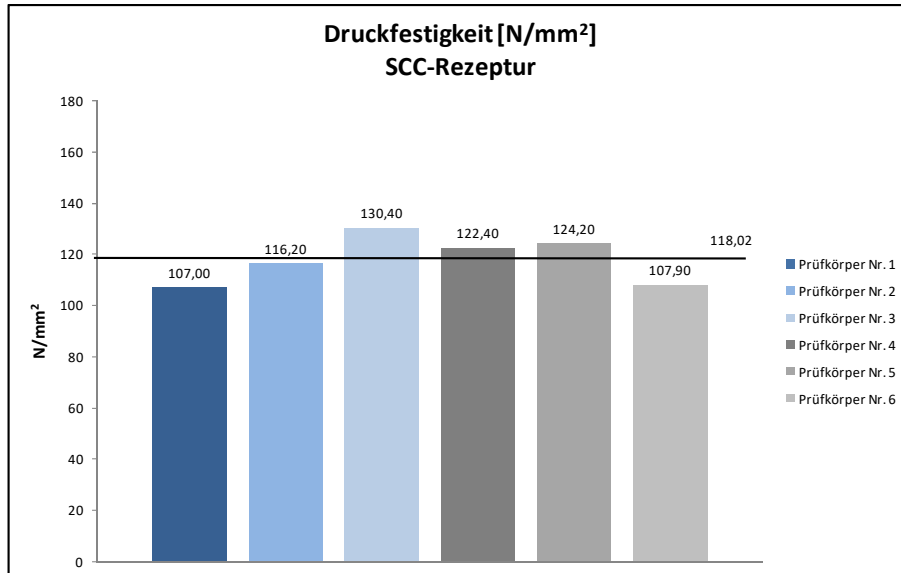


Diagramm 20 Suspensionsdruckfestigkeit (SCC) – MAT

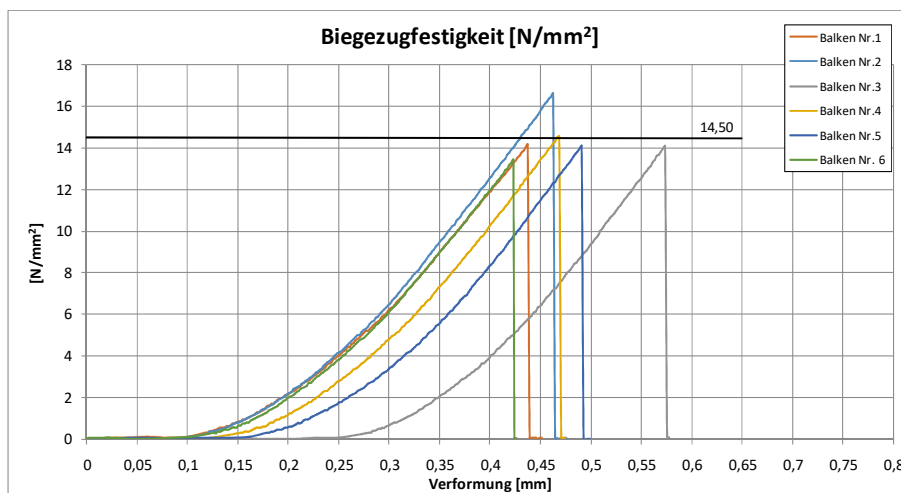


Diagramm 21 Suspensionsbiegezugfestigkeit (SCC) – MAT

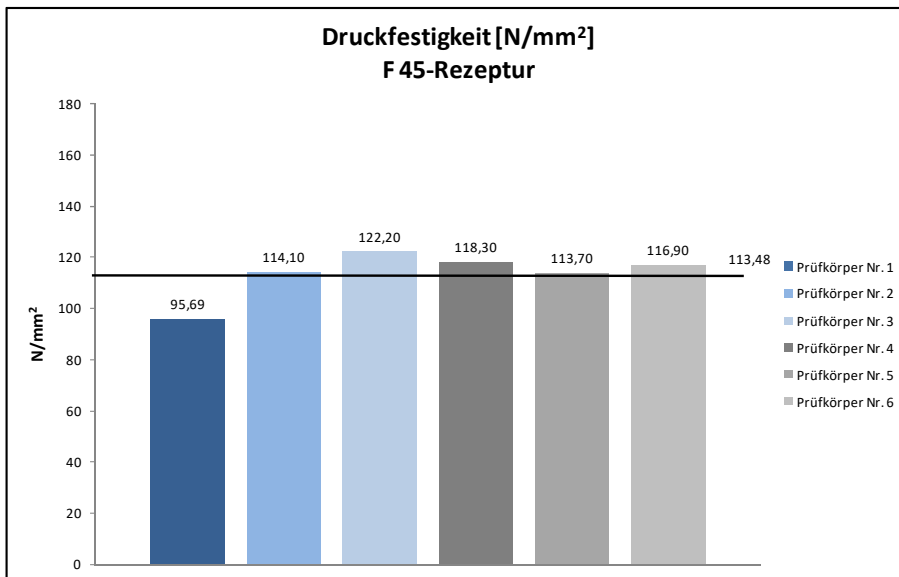


Diagramm 22 Suspensionsdruckfestigkeit (F 45) – MAT

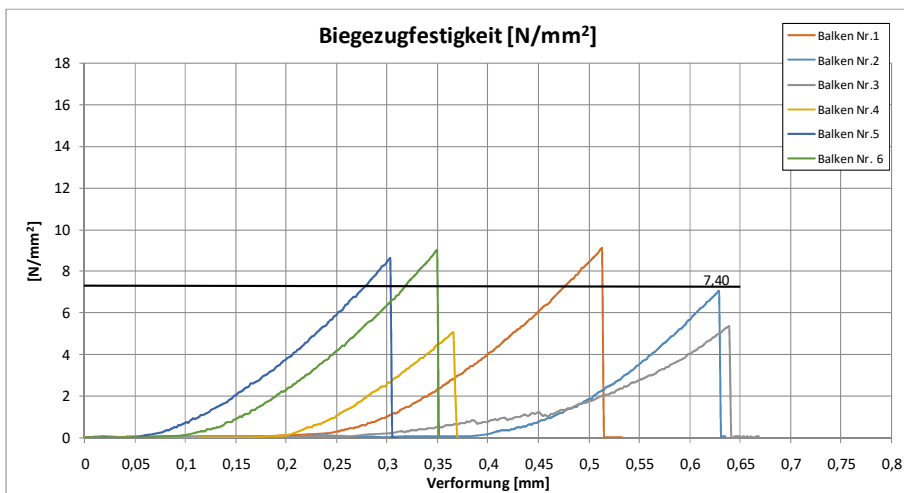


Diagramm 23 Suspensionsbiegezugfestigkeit (F 45) – MAT

5.10.4.2 Druck- und Biegezugfestigkeiten der Suspensionen-Eirich-Labor-Mischer

Die mit dem Eirich-Labormischer erzeugten Suspensionen erreichten im Durchschnitt eine Druckfestigkeit von $110,9 \text{ N/mm}^2$ (SCC) bzw. $119,8 \text{ N/mm}^2$ (F 45). Die mittlere Biegezugfestigkeit erreichte $7,3 \text{ N/mm}^2$ (SCC) bzw. $8,4 \text{ N/mm}^2$ (F 45).

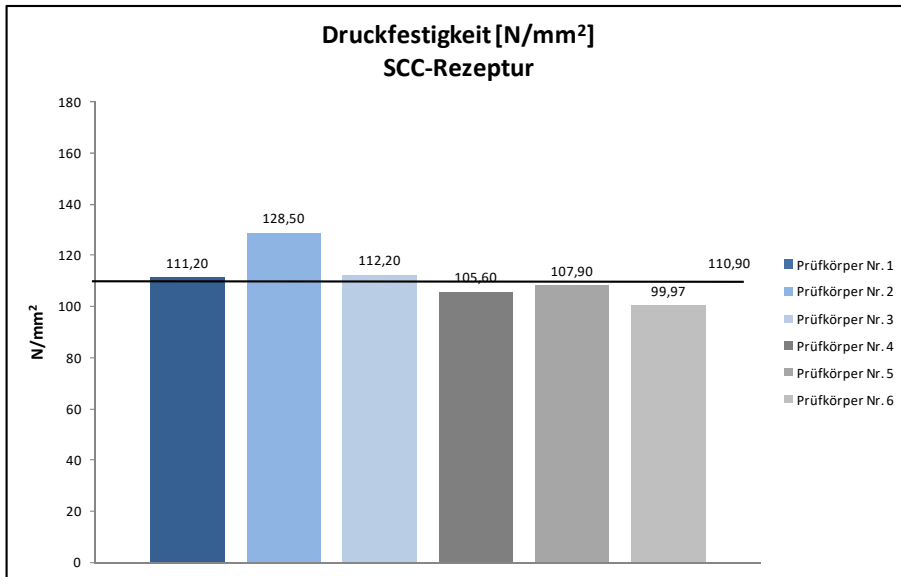


Diagramm 24 Suspensionsdruckfestigkeit (SCC) – Eirich

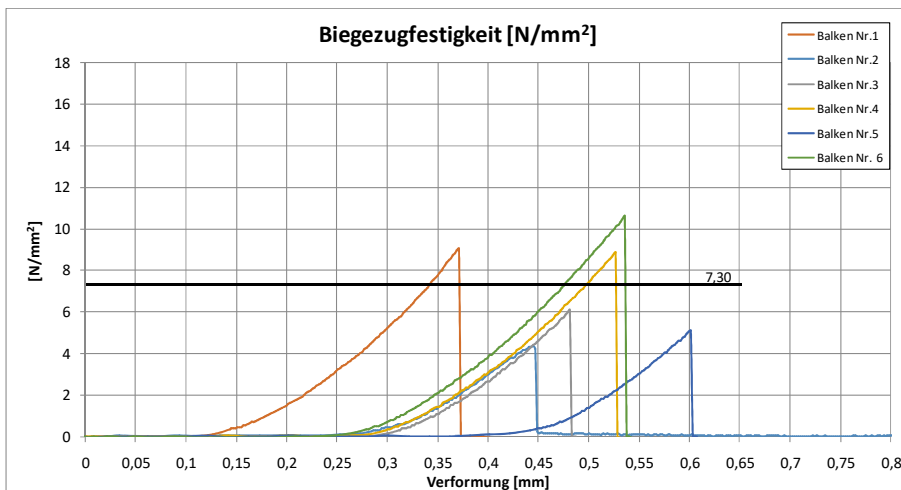


Diagramm 25 Suspensionsbiegezugfestigkeit (SCC) – Eirich

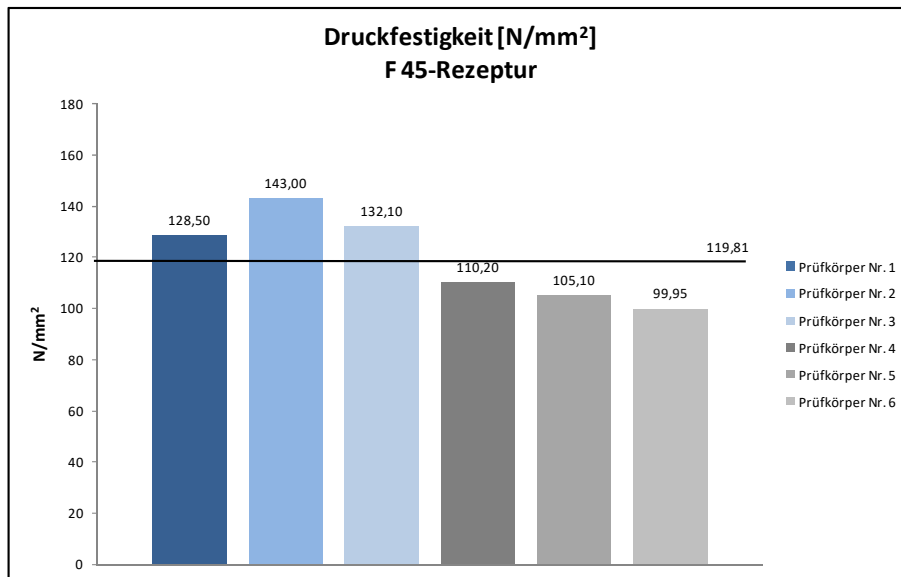


Diagramm 26 Suspensionsdruckfestigkeit (F 45) – Eirich

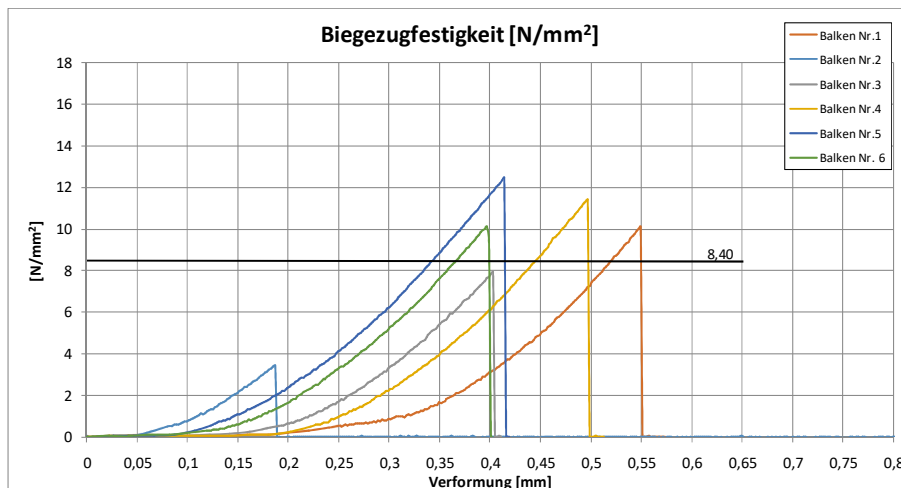


Diagramm 27 Suspensionsbiegezugfestigkeit (F 45) – Eirich

5.10.4.3 Druck- und Biegezugfestigkeiten der Suspensionen-Ultra Turrax T50

Die mit dem Ultra Turrax T50 erzeugten Suspensionen erreichten im Durchschnitt eine Druckfestigkeit von $116,8 \text{ N/mm}^2$ (SCC) bzw. $106,8 \text{ N/mm}^2$ (F 45). Die mittlere Biegezugfestigkeit erreichte $7,9 \text{ N/mm}^2$ (SCC) bzw. $9,4 \text{ N/mm}^2$ (F 45).

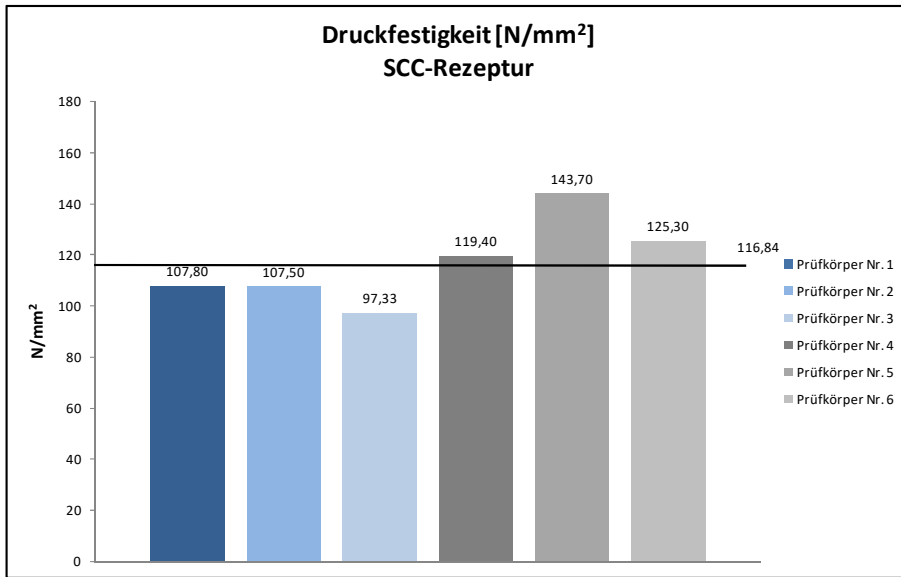


Diagramm 28 Suspensionsdruckfestigkeit (SCC) – Ultra Turrax T50

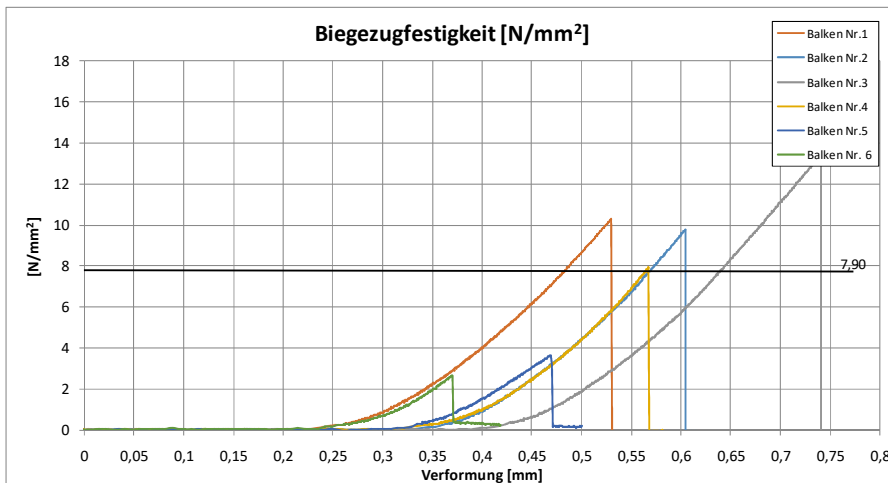


Diagramm 29 Suspensionsbiegezugfestigkeit (SCC) – Ultra Turrax T50

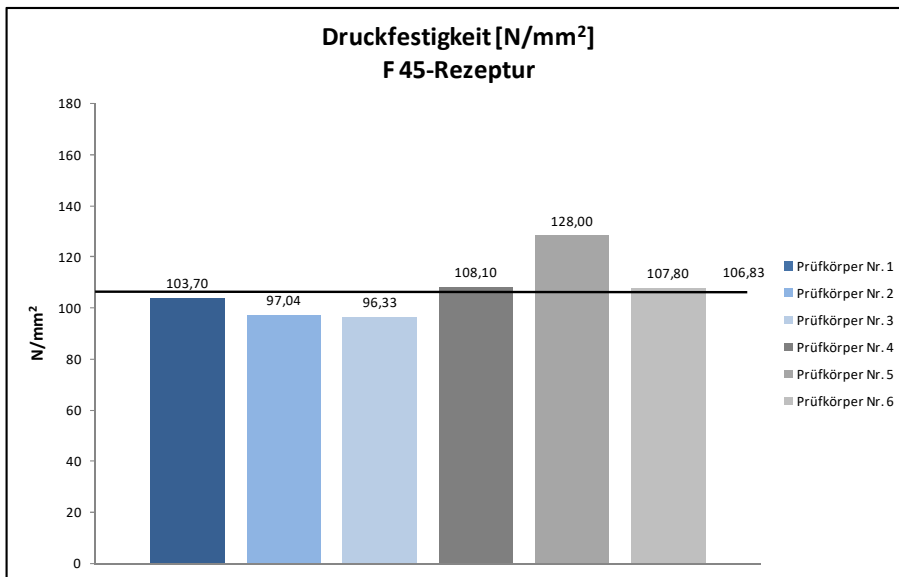


Diagramm 30 Suspensionsdruckfestigkeit (F 45) – Ultra Turrax T50

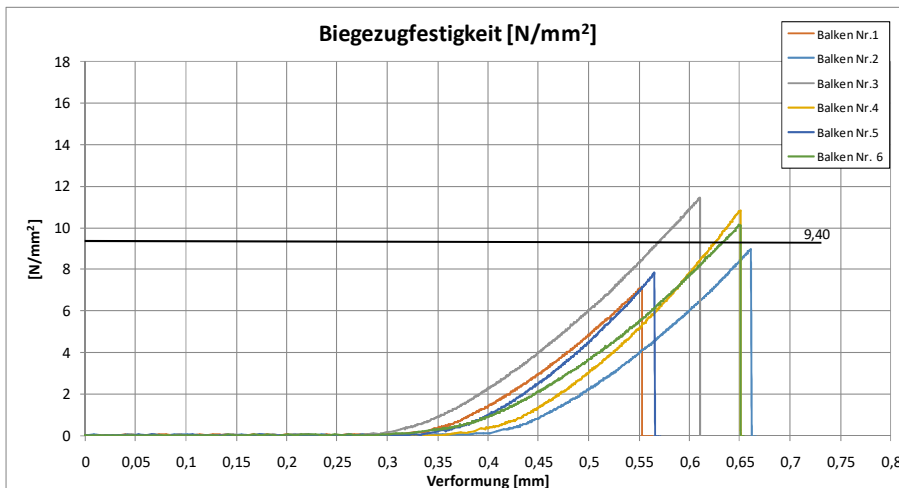


Diagramm 31 Suspensionsbiegezugfestigkeit (F 45) – Ultra Turrax T50

Während die mittels MAT-Gegenstrom-Intensivmischer hergestellten Prüfkörper der SCC-Rezeptur im Mittel eine Biegezugfestigkeit von 14,5 N/mm² erreichten, wurde bei den anderen Prüfkörpern nur eine halb so hohe Festigkeit (Eirich: 7,3 bzw. Ultra Turrax T50: 7,9 N/mm²) gemessen.

Zwischen den mittleren Biegezugfestigkeiten der unterschiedlichen Prüfkörper der SCC Rezeptur ergibt sich somit eine Standardabweichung von 3,97.

Bei den Prüfkörpern der F 45-Rezepturen war Schwankungsbreite zwischen der minimalen (7,4 N/mm²) und der maximalen (9,4 N/mm²) Biegezugfestigkeit geringer. Die Standardabweichung der mittleren Biegezugfestigkeiten der mittels F 45 Rezeptur hergestellten Prüfkörper fällt mit 1,01 deutlich geringer aus.

5.11 Versuche zur Dosiergeschwindigkeit beim MAT-Gegenstrom-Intensivmischer

Aufgrund der während der Mischversuche festgestellten Wirkungsweise des MAT-Gegenstrom-Intensivmischer (Mischdauer der Bindemittelsuspension entspricht dem Zugabezeitraum der Feststoffpartikel in den Flüssigkeitsstrom), sollte in einem Versuchsaufbau die maximal mögliche Dosiergeschwindigkeit von zwei unterschiedlich feinen Feststoffen ermittelt werden.

Hierzu wurde für eine Wassermenge von 10 Litern und 1,4 Litern Fließmittel die Gesamtmenge der granularen Ausgangsstoffe (57 kg) der Bindemittelsuspension (Zement, Mikrosilika und Quarzmehl) durch einen Stofftypen substituiert. Als Zugabestoff wurde einerseits ein feines Quarzmehl (maximale Partikelgröße 40 µm) und andererseits ein gröberer Quarzsand (maximale Partikelgröße 200 µm) verwendet.

Der Versuchsablauf gliederte sich in zwei Teile. In einem ersten Test wurde der Mischer durch eine immer schnellere Zugabe der Feststoffpartikel an seine Leistungsgrenze herangeführt, bis dieser zum Stillstand kam. Dafür wurde die gesamte Feststoffmenge (57 kg) auf 10 Kübel je 5,7 kg aufgeteilt und der Inhalt in immer kürzeren zeitlichen Abständen in den Mischer gefüllt.

Die Zugabemenge und die Zugabeintervalle wurden wie folgt festgelegt.

Lfd.Nr.	Kübelanzahl [Stk]	Zeitraum [s]
[A]	[B]	[C]
1	2	10
2	2	8
3	2	6
4	2	4
5	2	2

Tabelle 16 Zugabemenge und Zugabeintervalle

Durch die Ermittlung jenes Zugabeintervalles bis zu dem der Mischer das Mischgut noch durchmischen konnte, ohne zum Stillstand zu kommen, wurde anhand der eingebrachten Stoffmenge eine Zugabe geschwindigkeit [kg/sec] berechnet.

Im Anschluss wurde im zweiten Teil der Dosierversuche der Feststoff mit der zuvor ermittelten Dosiergeschwindigkeit kontinuierlich in den Mischer gefüllt. Für eine Befüllung mit kontinuierlicher Geschwindigkeit wurde ein Krankübel mit variabel einstellbarer Größe der Entleeröffnung verwendet.

5.11.1 Dosierversuche: Quarzmehl (max. Partikelgröße: 40 µm)

Bei den Dosierversuchen mit dem Quarzmehl konnte der Mischprozess im ersten Teil des zweistufigen Versuches bis zum Zugabeintervall drei aufrechterhalten werden, bevor es zum Stillstand des Mischers kam. Aus

der in den Mischer gefüllten Gesamtmenge des Quarzmehls (6 Kübel mit je 5,7 kg) und den drei Zugabeintervallen (10, 8 und 6 Sekunden) ergibt sich eine Dosiergeschwindigkeit von 1,43 kg/s

$$v_f = \frac{6 \times 5,7}{10 + 8 + 6} = \frac{34,2}{24} = 1,43 \text{ kg/s}$$

Im zweiten Teil der Dosierversuche wurde das Quarzmehl mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit von 1,43 kg/s in den Flüssigkeitsstrom des MAT-Gegenstrom-Intensivmischers gefüllt.

Beim kontinuierlichen Befüllungsprozess konnte 25 Sekunden lang befüllt werden, bevor es zu einem neuerlichen Mischerstillstand kam. Durch Subtraktion des zu diesem Zeitpunkt noch im Betonkübel befindlichen Materials (21,45 kg) von der Gesamtmenge (57 kg) ergibt sich nach 25 Sekunden eine im Mischer befindliche Quarzmehlmenge von 35,55 kg. Dividiert man die 35,55 kg durch den 25 sekündigen Zugabezeitraum ergibt sich eine Dosiergeschwindigkeit von 1,42 kg/s. Die aus dem ersten Teil abgeschätzte Zugabegeschwindigkeit von 1,43 kg/s kann für eine kontinuierliche Zugabe somit bestätigt werden.

5.11.2 Dosierversuche: Quarzsand (max. Partikelgröße: 200 µm)

Die Gestaltung der Dosierversuche mit dem Quarzsand erfolgte analog zu den Versuchen mit dem Quarzmehl. Im ersten Teil des Versuchs konnte der Mischprozess bis zu einem Zugabeintervall von 4 Sekunden aufrechterhalten werden, bevor es zum Mischerstillstand kam. Daraus ergibt sich eine Dosiergeschwindigkeit von 1,63 kg/s.

$$v_g = \frac{8 \times 5,7}{10 + 8 + 6 + 4} = \frac{45,6}{28} = 1,63 \text{ kg/s}$$

Im zweiten Teil der Dosierversuche trat der freifließende Quarzsand aufgrund der zu weit geöffneten Entleeröffnung des Betonkübels etwas schneller als die geplanten 1,63 kg/s aus. Es folgte daher bereits nach 26 Sekunden eine komplette Entleerung des Betonkübels (57 kg) in den MAT-Gegenstrom-Intensivmischer. Trotz der hohen Dosiergeschwindigkeit (2,19 kg/s) kam es beim Quarzsand im Gegensatz zum Quarzmehl jedoch zu keinem Stillstand des Mixers.

5.11.3 Abschätzung der Zugabezeit verschiedener Partikelkörnungen

Die aus den beiden Dosierversuchen ermittelten Zugabegeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Partikelgröße sind in Diagramm 32 dargestellt. Anhand von diesem Diagramm kann somit für zukünftige Mischprozesse die Zugabezeit verschiedener Partikelgrößen grob abgeschätzt werden.

Als Grenzbedingung für eine gegen null gehende Partikelgröße, wurde aufgrund der ins Unendlich gehenden Partikeloberfläche eine Zugabegeschwindigkeit von 0 kg/s festgelegt.

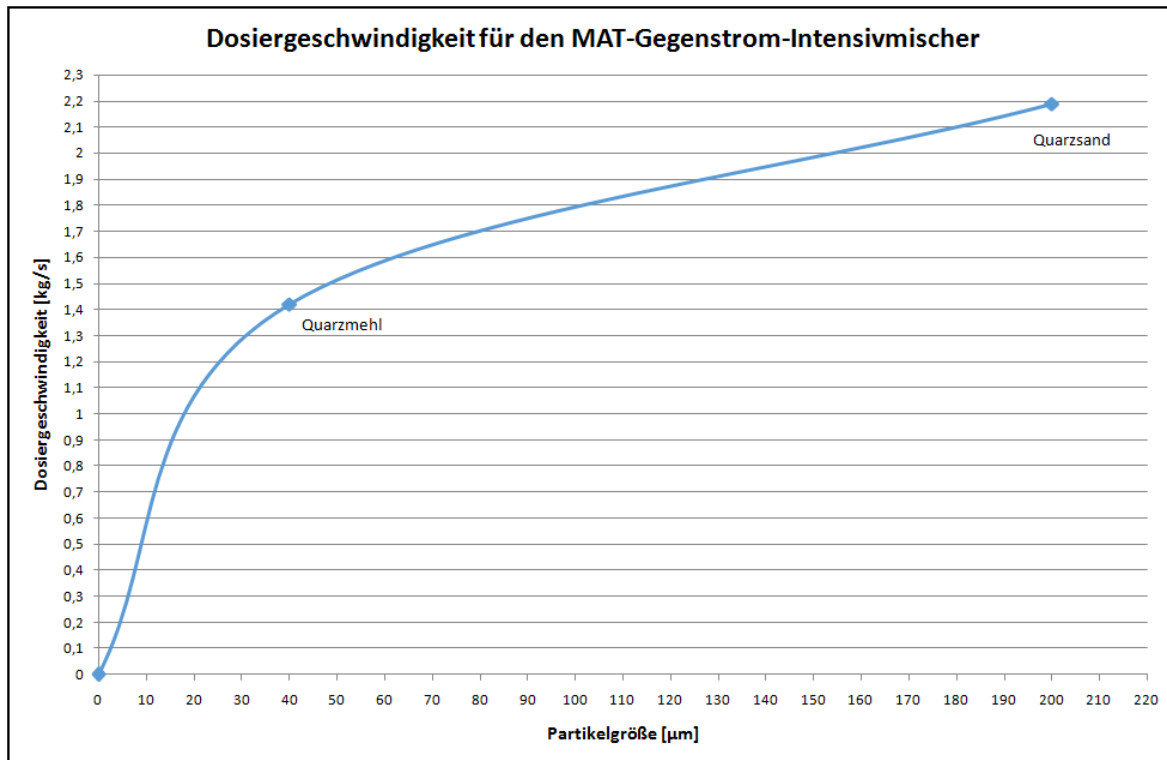


Diagramm 32 Dosiergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Partikelgröße für den MAT-Gegenstrom-Intensivmischer

6 Schlussfolgerungen aus den Mischversuchen

Die in Kapitel 5 durchgeführten Mischversuche zeigen, dass die derzeit genutzten Mischermodele Skako Rotoconix und Kniele KKM Konusmischer in ihren Standardausführungen bei einem Füllungsgrad von 100% für eine kontinuierliche Massenproduktion von Ultrahochleistungsbeton noch nicht geeignet sind.

Die Ursache hierfür liegt hauptsächlich in der in beiden Fällen limitierten Motorleistung von 15 kW (Standardausführung) und in dem zu geringen Drehmoment ($< 1000 \text{ Nm}$) der Mischwerkzeugmotoren. In Verbindung mit der Vollfüllung des Mixers (500 l) und dem niedrigen Wassergehalt des Betons (W/B-Wert $\approx 0,24$) führte dies sowohl beim Skako Rotoconix als auch beim Kniele KKM Konusmischer zu Problemen in der Betonproduktion sowie zu beträchtlichen Zeitverlusten während des Mischprozesses.

Am MAT-Gegenstrom-Intensivmischer konnten hingegen keine Mischprobleme die zu Zeitverlusten führten ausgemacht werden. Die schmale Entleeröffnung führte jedoch dazu, dass sich während des Entleerprozesses abschnittsweise Faserkonzentrationen bildeten und im entleerten Frischbeton als Faserigel auftraten.

Vergleicht man die beiden 500 Liter Mischertypen miteinander zeigt sich, dass der Skako Rotoconix sowie der Kniele KKM Konusmischer für die erste Mischphase (Herstellung der Bindemittelsuspension) eine vier- bis fünfminütige Nassmischzeit benötigten. Zwar war das Ergebnis der ersten Mischphase in beiden Fällen eine Bindemittelsuspension, nach visuellen Gesichtspunkten unterschieden sich die beiden Bindemittelsuspensionen jedoch deutlich voneinander.

Während die mit dem Skako Rotoconix hergestellte Bindemittelsuspension Agglomerate im Größenbereich von 0,1-1 mm aufwies, waren bei der vom Kniele KKM Konusmischer gemischten Suspension nach Abschluss der ersten Mischphase deutlich sichtbare Agglomerate (im Bereich von 2 mm) in der Suspension enthalten.

Beim MAT-Gegenstrom-Intensivmischer konnten hingegen keine Partikelzusammenschlüsse ausgemacht werden. Die mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer hergestellte Bindemittelsuspension wies daher die größte Homogenität aller Suspensionen auf.

Die eingeschränkte Homogenität und die damit verbundene Reduktion der Mischqualität beim Kniele KKM Konusmischer ist vor allem durch die geringere maximale Umdrehungszahl sowie durch die Ausbildung des Mischwerkzeugs und dem damit verbundenen Materialtransport zu erklären. Während der Bindemittelleim beim Skako Rotoconix mit 203 U/min bzw. mit 6,4 m/s gemischt wurde, erreichte der Kniele KKM Konusmischer maximal 168 U/min.

Des Weiteren wurde beim Skako Rotoconix mit einer Motorleistung von 16 kW im Vergleich zum Kniele KKM Konusmischer (rund 6 kW), beinahe

die dreifache Mischarbeit bei der Bindemittelleimerzeugung in das Mischgut eingebracht.

Wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert, hat die geometrische Ausbildung des Mischwerkzeugs einen entscheidenden Einfluss auf die Auflösung von Agglomeraten und damit auf die Mischqualität.

Während beim Skako Rotoconix der Desagglomerationsprozess durch den Hochgeschwindigkeitswirbler, der im Mischgut aufgrund seiner geometrischen Form und den hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten im unteren Bereich des Mischers Radialströmungen mit hoher Energiedissipation erzeugt, getrennt vom Grobvermischungsprozess bzw. der vertikalen Mischgutförderung durch die Zwei-Wegeschnecke stattfindet, besitzt der Kniele KKM Konusmischer lediglich ein Mischwerkzeug welche primär einen konvektiven Materialtransport (Grobvermischung) vollführt.

Durch die Ausbildung des inneren Rührwerks als Schnecke mit zusätzlichen Paddeln im oberen Bereich beruht die Mischwirkung beim Kniele KKM Konusmischer primär auf einer vertikalen Förderung, bei dem das Mischgut vom Behälterboden mit der Schnecke nach oben gefördert wird, durch die Paddel an die Behälterwandung geworfen und mit Hilfe der Randabstreifer wieder nach unten gefördert wird.

Für das Aufbrechen der Agglomerate sind an den Außenkanten der Schnecke sowie an den Mischpaddeln (siehe Abbildung 51) Messer bzw. Stifte in unterschiedlicher Länge angeordnet. Die Ergebnisse des Mischversuches zeigen jedoch, dass die im Bindemittelleim enthaltenen Agglomerate durch die Anordnung der Messer nicht ausreichend aufgebrochen werden konnten.

Verschiedene Untersuchungen von SAFRANEK, LIEBLANG und BAUMERT zeigen, dass die Anordnung von Messer bzw. Stiften einen deutlichen Einfluss auf die Scherung des Mischgutes bzw. auf dessen Desagglomeration besitzt. Hierbei sind vor allem bei Mischwerkzeugen bei denen die Messer oder Stifte parallel Rotationsachse des Mischwerkzeugs angeordnet sind, die besten Frisch- und Festbetoneigenschaften bestimmt worden [11], [61], [36].

Die Messer bzw. Stifte beim Mischwerkzeug des Kniele KKM Konusmischer sind nach den Erkenntnissen von SAFRANEK, LIEBLANG und BAUMERT durch ihre horizontale Anordnung jedoch um 90° falsch angeordnet, wodurch es zu einem geringeren Eintrag von Scherkräften in das Mischgut kommt. Des Weiteren fällt auf, dass die Anzahl der Messer auf der Schnecke und der Paddel sehr gering ist und das Potenzial zur Desagglomeration dadurch weiter reduziert wird.

Da beim MAT-Gegenstrom-Intensivmischer durch das kontinuierliche "einrieseln" der Feststoffe in den Flüssigkeitsstrom sämtliche Partikel von Beginn an mit Flüssigkeit in Kontakt treten, werden Partikelzusammenschlüsse weitgehend vermieden. Durch die hohen Drehgeschwindigkeiten im Intensivmischraum erfolgt desweiteren eine umfassende Dispergierung der Feststoffe durch das perforierte Mischwerkzeug und eine vollständige Benetzung der Partikel mit Wasser und Fließmittel.

Der Ausfall der Antriebsmotoren in der zweiten Phase der Mischversuche an den beiden 500 Liter Mischern ist mit dem sprunghaften Anstieg der Widerstandskräfte, die durch das Einmischen der Grobkornfeststoffe in die Bindemittelsuspension hervorgerufen wurden in Verbindung mit einem zu schwach dimensionierten Antriebsmotor der Mischwerkzeuge zu erklären. Die sich aus dem Kontakt der Grobkornpartikel mit der Suspension bildenden Partikelgranulate werden dabei zusätzlich durch die „vernadelnde“ Wirkung der Stahlfasern noch stärker zusammengehalten. Der Widerstand der Agglomerate Platzwechselforgänge vorzunehmen bzw. die Agglomerate aufzubrechen wird dadurch weiter erhöht.

Der damit verbundene Anstieg des Mischwiderstandes führte somit zu einer Vergrößerung des Leistungsbedarfs der Mischwerkzeuge. Aufgrund der limitierten Motorleistung von 15 kW konnte der geforderte Leistungsbedarf jedoch nicht in das Mischgut eingebracht werden, wodurch es zum Stillstand der Antriebsmotoren beider Mischertypen kam.

Durch den Wechsel des 15 kW Antriebsmotors auf einen 22 kW Motor bei gleichzeitiger Erhöhung des Drehmoments (+77%) konnte im Zuge des zweiten Teils der Mischversuche am Skako Rotoconix der Mischprozess ohne Motorproblem durchgeführt werden.

Da beim MAT-Gegenstrom-Intensivmischer die Feststoffe kontinuierlich in den Flüssigkeitsstrom eingebracht wurden, kam es hier nie zu einem schlagartigem Anstieg der Widerstandskräfte. Der MAT-Gegenstrom-Intensivmischer kann daher im Vergleich zu den beiden anderen getesteten Mischmodellen mit einem deutlich niedrigeren Energiebedarf und gleichzeitig mit hohen Drehzahlen betrieben werden.

Neben der Werkzeuggestaltung unterschieden sich die der Skako Rotoconix und der Kniele KKM Konusmischer auch in der Ausbildung und Wirkungsweise der Randabstreifer. Während beim Skako Rotoconix das an den Trogwänden befindliche Mischgut durch die Trogrotation zu den stationären Randabstreifern geführt und von dort zurück in Richtung des Werkzeuges befördert wird, wird beim Kniele KKM Konusmischer die Behälterwand durch rotierende Wandabstreifer abgestreift. Diese führen das Mischgut entlang der Behälterwand nach unten zum inneren Rührwerkzeug.

Beim Skako Rotoconix-Mischer sind im Gegensatz zum Kniele KKM Konusmischer die Randabstreifer zusätzlich leicht abgefast, wodurch an der Behälterwand anhaftendes Material von den Randabstreifern leichter abgeschert werden kann.

Die Randabstreifer des KKM Konusmischer sind hingegen massiver ausgeführt und besitzen keine bzw. nur eine geringe „abkratzende“ Wirkung. Im Zuge der Versuche war hierbei insbesondere zu erkennen, dass das Mischgut in den wandnahen Bereichen durch die Randabstreifer lediglich vor sich hergeschoben bzw. entlang der Behälterwand geführt wurde.

7 Vorschläge zur Optimierung der Mischtechnik

Aus den durchgeführten Mischversuchen ist zu entnehmen, dass die beiden getesteten 500 Liter Mischer in ihren Standardausführungen bei einem Füllungsgrad von 100 % an ihre Leistungsgrenzen stoßen. Aus diesem Grund sind für eine konstante und zeitsparende Betonproduktion wie sie beispielsweise für das in Kapitel 1 beschriebene Projekt "QUICKWAY" erforderlich sind, Adaptierungen an den Mixchern sowie am Mischprozess vorzunehmen.

Um eine kontinuierliche und zeitsparende Betonproduktion gewährleisten zu können, muss bei beiden Mixchern die Antriebsleistung sowie das Drehmoment deutlich gesteigert werden, damit die geforderten Betonqualitäten in den geforderten Mengen und ohne Motorprobleme hergestellt werden können.

Die Möglichkeit eines Wechsels auf ein nächstgrößeres Mischmodell bei gleichbleibender Betonmenge und der damit verbundenen Reduktion des Füllungsgrades erscheint aus Sicht des Autors der vorliegenden Arbeit als nicht sinnvoll. Einerseits werden dadurch die möglichen Ressourcen nicht vollständig ausgeschöpft und andererseits sind im Falle des QUICKWAY Projektes, bei dem der Mischer auf einem Sattelaufleger installiert werden soll (mobile Mischanlage) die maximal zulässigen Mischerabmessungen durch die Aufliegerabmessungen bzw. durch die Bestimmungen der Straßenverkehrsordnung beschränkt.

Für eine hohe Misch- und der damit verbundene Betonqualität ist bei der Herstellung der Bindemittelsuspension die Auflösung von Partikelgranulaten bzw. Agglomeraten maßgeblich. Für eine kontinuierliche und zeitsparende (Massen-) Betonproduktion in hoher Qualität kann nach Auffassung des Autors hierzu einerseits das Mischwerkzeug (Wirbler) der Großmischer adaptiert oder aber andererseits ein kombinierter bzw. zweistufiger Mischablauf (Herstellung der Bindemittelsuspension in einem Suspensionsmischer mit anschließendem Einmischen der Grobkornfraktion mittels herkömmlichen Großmischer) erfolgen. Beide Möglichkeiten werden nachfolgend beschrieben.

7.1 Optimierung des Mischwerkzeugs

Da sowohl die vom Skako Rotoconix als auch die vom Kniele KKM-Konusmischer hergestellte Bindemittelsuspension sichtbare Agglomerate enthält, sind für eine weitreichende Desagglomeration beim Mischen von Ultrahochleistungsbetonen, Adaptierungen an den Mischwerkzeugen durchzuführen. Wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert, sind die eingebrachten Scherkräfte und damit der Desagglomerationseffekt des Mischwerkzeugs umso höher, je steiler das Mischgut auf das Mischwerkzeug trifft. Für eine wirkungsvolle Umgestaltung sind insbesondere die Erkenntnisse von SAFRANEK, LIEBLANG und BAUMERT zu berücksichtigen. Demzufolge erhöhen vertikal am Mischwerkzeug angebrachte Stifte bzw. Messer die Desagglomerationswirkung des Mischwerkzeugs. In Abbil-

dung 96 folgt hierzu eine Gegenüberstellung des Standardwirblers des Skako Rotoconix-Mischers und einer vom Autor der vorliegenden Arbeit erstellten adaptierten Version des Mischwerkzeugs. Das adaptierte Mischwerkzeug verfügt durch die Anordnung von Stiften parallel zur Drehachse des Mischwerkzeugs gegenüber dem Standardwerkzeug über einen erhöhten Schereffekt. Besonders die an den Außenkanten des Mischwerkzeugs positionierten Stifte sorgen durch ihre vertikale Anordnung in Verbindung mit hohen Drehgeschwindigkeiten für eine starke Scherung des Mischguts. Durch die zusätzliche Ausfachung im Werkzeugkern erfolgt in Verbindung mit den innenliegenden Stiften überdies eine Scherung des Mischguts bei unterschiedlichen Anström-winkeln.

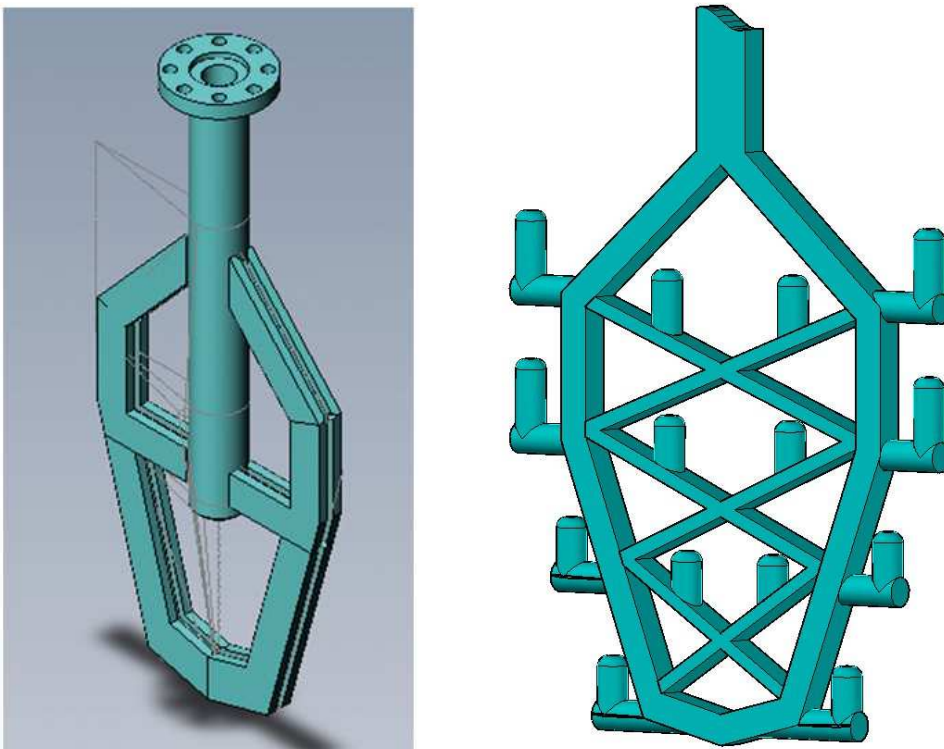


Abbildung 96 Gegenüberstellung des Standardwirblers des Skako Rotocox-Mischers (links) und einer adaptierten Version des Wirblers (rechts)

7.2 Gestaltung eines optimalen Mischablaufs für die Herstellung von UHPC

Da die Betoneigenschaften (Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dichtigkeit) neben den spezifischen Eigenschaften der Mischungsbestandteile (Partikelfestigkeit, Menge, Größe, Packungsdichte etc.) maßgeblich vom Mischprozess abhängen, erfordern hohe Betonqualitäten einen optimalen Mischablauf, in dem die einzelnen Komponenten bestmöglich homogenisiert werden. Nachdem etwaige Partikelzusammenschlüsse (Agglomerate) eine vollständige Flüssigkeitsbenetzung sämtlicher Partikel verhindern und während der Betonerhärtung zur Entstehung von Gefügestörungen führen, die eine Verminderung der Betonqualitäten nach sich

ziehen, ist der Mischablauf so zu gestalten, dass eine umfassende Zerstörung der Agglomerate erfolgt.

Die Misch- sowie die Suspensionsversuche aus Kapitel 5 zeigen, dass für eine schnelle, kontinuierliche und qualitativ hochwertige Betonproduktion die Gestaltung eines zweistufigen, kombinierten Mischablaufs am geeignetsten erscheint.

Hierbei wird in einem ersten Prozessschritt aus den Feinstoffen (Zement, Mikrosilika, Quarzmehl) und den Flüssigkeiten (Wasser und Fließmittel) eine Bindemittelsuspension erzeugt. Im Anschluss daran erfolgt in einem zweiten Prozessabschnitt das Einmischen der Grobkornpartikel und der Stahlfasern. Um bereits unabhängig vom eigentlichen Nassmischprozess die Mischzeit zu verkürzen, sind die für den ersten sowie für den zweiten Prozessabschnitt verwendeten Partikelfraktionen bereits im Vorfeld separat trocken vorzumischen (Herstellung einer Feinkorn- und Grobkorn-Premix). Des Weiteren dient die Premix-Erzeugung auch dazu, die Stahlfasern in der Grobkornfraktion weiträumig zu verteilen und so die Bildung von Faserkonzentrationen während des Nassmischens zu verhindern. Da für die Premix-Erzeugung keine Anforderungen an die Agglomeratauflösung bestehen können herkömmliche Chargenmischer wie beispielsweise Planetenmischer oder Ähnliche verwendet werden.

Die Auswahl des Fließmittels hat nach den jeweiligen Anforderungen an den Frischbeton zu erfolgen. Wird der Beton als Transportbeton verwendet, ist ein konsistenzhaltendes Fließmittel, welches gegenüber von konsistenzbildenden Fließmittel für die Fertigteilindustrie über einen verzögerten Eintritt der Verflüssigungswirkung verfügt und somit den Herstellungsprozess der Bindemittelsuspension geringfügig verlängert.

Die Vorteile dieses zweistufigen Fertigungsprozesses (schnelle und einfache UHPC-Produktion, Verbesserung der Betonqualität etc.) durch die Anwendung dieser Art der Betonerzeugung wurden bereits von der Firma "German Sucon" in der Praxis bestätigt (Suspension Concrete) [96]. Hier erfolgt die Herstellung von UHPC ebenfalls durch das Einmischen der Grobgesteinskörnungen in eine Bindemittelsuspension.

7.2.1 1. Prozessabschnitt – Erzeugung der Bindemittelsuspension

Damit eine möglichst rasche Verteilung der Flüssigkeiten erreicht und ein Maximum an Scherkräften in das Mischgut eingetragen wird, ist für den ersten Prozessschritt ein Mischsystem mit sehr hohen Werkzeuggeschwindigkeiten (≥ 6 m/s) zu wählen. In Anbetracht der Mischversuche aus Kapitel 5 eignet sich für die Suspensionserzeugung aufgrund der starken Verflüssigungswirkung insbesondere der MAT-Gegenstrom-Intensivmischer. Durch seine besondere Wirkungsweise (Dosierung der Partikelfraktionen in den Flüssigkeitsstrom), wird die Entstehung von Partikelzusammenschlüssen vermieden. Des Weiteren erfolgt anhand der Mischwerkzeuge ein kolloidaler Aufschluss der Suspension und somit eine vollständige Dispergierung der Feststoffe im Flüssigkeitsstrom. Als Alternative zum MAT-Gegenstrom-Intensivmischer kann für die Sus-

pensionserzeugung auch ein Mischsystem mit einem Hochgeschwindigkeitswirbler (z.B. Eirich-Intensivischer) verwendet werden. Hierbei ist besonders auf die Werkzeuggeschaltung zu achten. Für eine umfassende Auflösung der Agglomerate sind Wirbler zu verwenden, bei denen der Mischgutstrom möglichst orthogonal auf die Wirblerkanten trifft (z.B. Stiftenwirbler).

Damit der Entstehung von Agglomeraten durch teilgesättigte Partikelkollektiven entgegengewirkt wird, ist das Feinkorn-Premix gleichmäßig in den mit Flüssigkeit beschickten Mischer einzubringen. Ein passendes Instrument zur Abschätzung der Dauer des Dosierprozesses sind die in Kapitel 5.11 durchgeführten Versuche zur Dosiergeschwindigkeit.

Der Eintrag der Feststoffpartikel in die Flüssigkeit erfolgt hierbei bei sehr hohen Werkzeuggeschwindigkeiten (≥ 6 m/s).

Um die Dispergierwirkung zu steigern, ist ein zweistufiges Zugabeverfahren des Fließmittels anzuwenden. Dazu werden zu Beginn des Mischablaufs $2/3$ der Fließmittelmenge dem Anmachwasser zugegeben, in das die Feinkornpartikel bei der Suspensionserzeugung eingemischt werden.

Der Hintergrund für dieses zweistufige Fließmittelzugabeverfahren ist das Hydratationsverhalten des Bindemittels. Der Flüssigkeitskontakt mit dem Bindemittel führt zum sofortigen Entstehen von ersten Hydratationsprodukten, wodurch die Fließmittelmoleküle mit zunehmender Zeit überwachsen und unwirksam werden. Durch die Zugabe des restlichen Fließmittels in einem zweiten Zugabeschritt zu einem späteren Zeitpunkt (kurz vor dem Mischende der Suspensionserzeugung), wird dem entgegengewirkt. Das Ende des ersten Prozessabschnitts kennzeichnet eine homogene Bindemittelsuspension in der sämtliche Feststoffpartikel vollständig mit Flüssigkeit benetzt sind.

7.2.2 2.Prozessabschnitt – Einmischen der Grobkornfraktion

Nach Beendigung des Mischprozesses der Bindemittelsuspension beginnt der zweite Prozessabschnitt der UHPC-Erzeugung. Hierzu ist in die Bindemittelsuspension das Grobkorn-Premix (Korngröße $> 0,125$ mm) einzumischen.

Um die Entstehung von zu hohen Widerstandskräften im Mischgut zu vermeiden und dadurch zu starken Motorbelastungen entgegen zu wirken, ist der Zugabeprozess der Grobkorn-Premix in die Suspension so zu gestalten, dass das Premix nicht schlagartig wie beispielsweise durch die Entleerung eines Big-Bags, sondern sukzessive erfolgt ("Einrieseln" der Premix mittels Sieb bzw. kontinuierliche Beschickung mittels Förderband oder Pneumatik).

Da bei Partikelgrößen $> 0,1$ mm das Potenzial zur Bildung von Partikelzusammenschlüssen gering ist und Agglomerate der Feinststoffe bereits während der Suspensionserzeugung durch hohe Werkzeuggeschwindigkeiten aufgelöst wurden, ist im zweiten Prozessabschnitt der UHPC Erzeugung die Werkzeuggeschwindigkeit zu reduzieren ($\sim 1,5$ m/s). Die

Reduktion der Werkzeuggeschwindigkeit führt hierbei neben einem reduzierten Energieverbrauch und einer geringeren Erwärmung des Frischbetons auch dazu dass, etwaige Hydratationsprodukte nicht zerstört und dadurch neue Reaktionsflächen erzeugt werden, die zu einer Erhöhung des Wasser- und Fließmittelanspruchs führen.

Für das Einmischen der Grobkornpartikel und der Stahlfasern können entweder Planetenmischer oder andere in der Praxis verwendete Zwangsmischer verwendet werden. Um jedoch eine Umfassende Verteilung der Grobkornpartikel und der Stahlfasern zu erreichen, wird die Verwendung von Mixchern die durch ihre Mischwerkzeuge vertikale und horizontale Mischgutströme erzeugen empfohlen. Ein Beispiel hierfür ist der Skako-Rotoconix der neben dem Hochgeschwindigkeitswirbler über eine Förderschnecke verfügt, die für eine schonende Umwälzung des Mischguts sorgt.

Der zweite Prozessabschnitt ist mit dem vollständigen Einrühren der Grobkorn-Premix und anschließender Homogenisierung des Mischguts abgeschlossen. Werden dem Mischgut noch etwaige Betonzusatzmittel (Entschäumer, Luftporenbildner etc.) zugegeben sind diese im Anschluss an die Grobkorn-Premix in das Mischgut einzurühren.

Das beschriebene zweistufige Mischverfahren führt durch den getrennten aber parallel ablaufenden Mischprozess (Erzeugung der Bindemittelsuspension mittels Suspensionsmischer bzw. Einrühren der Grobkorn-Premix in die Suspension mittels Zwangsmischer mit Rührwerk oder Schnecke) durch den gleichzeitigen Ablauf der beiden Prozessschritte zu einer Mischzeiteinsparung. Des Weiteren wird dadurch eine hochaufgeschlossene Bindemittelsuspension erzeugt, die zu einer verbesserten Betonqualität führt.

Der Nachteil in diesem zweistufigen Mischprozess liegt jedoch darin, dass für die beiden hintereinander geschalteten Prozessschritte ein entsprechender maschinentechnischer Aufwand erforderlich ist und dies zu zusätzlichen Kosten bei der UHPC-Herstellung führt. Bei entsprechend langer Nutzung (30 Jahre) fällt dies jedoch nicht ins Gewicht.

7.2.3 Prognosemodell zur Anwendung des optimierten Mischablauf für die Herstellung von 500 Liter UHPC

Für die beiden in Kapitel 7.2.1 und 7.2.2 beschriebenen Prozessabschnitte werden nun mit Hilfe der in Kapitel 5.11 ermittelten Dosiergeschwindigkeiten die einzelnen Prozesszeiten für die Herstellung von 500 Liter Frischbeton prognostiziert.

Zur Prognose der Mischzeit von 500 Liter UHPC werden die aus Kapitel 5.5 verwendeten "Premixmengen" für die SCC-Rezeptur (508 kg "Feinkornpremix" bzw. 560 kg "Grobkorn-Stahlfaserpremix") herangezogen.

Für die Befüllung des "Feinkornpremix" ist nach Kapitel 5.11 eine Dosiergeschwindigkeit von 1,43 kg/s möglich. Da bei den Versuchen in Kapitel 5.11 jedoch ein Labormischer mit einer maximalen Füllmenge

von 50 Liter verwendet wurde und für die Herstellung von 500 Liter Frischbeton ein größeres Mischermodell benötigt wird, ist aufgrund des größeren Mischraums eine deutliche Steigerung der Zugabegeschwindigkeit möglich.

Da die Dosiergeschwindigkeit von 1,43 kg/s jenen Grenzwert bei dem der Mischer an seine Leistungsgrenze geführt wird darstellt, ist bei einer Vergrößerung des Mischermodells (Steigerung des Suspensionsfassungsvermögens um einen Faktor 10 von 50 auf 500 Liter) für einen komplikationsfreien aber dennoch zeitlich optimierten Mischablauf die Dosiergeschwindigkeit der "Feinkornpremix" nach Auffassung des Autors der vorliegenden Arbeit statt mit einem Faktor 10 um einen um 30% abgeminderten Faktor (= 7) zu erhöhen. Für die Herstellung der Bindemittelsuspension für 500 Liter UHPC ergibt sich somit eine Dosiergeschwindigkeit des "Feinkornpremix" von $v_f = 10,01$ kg/s.

$$v_f = 1,43 \times 7,00 = 10,01 \text{ kg/s}$$

Bezogen auf die Menge des "Feinkornpremix" ergibt sich daraus eine Dosierzeit von rund 51 Sekunden.

$$t_f = \frac{508}{10,01} = 50,75 \text{ s}$$

Für einen vollständigen Aufschluss der Feinkornpartikel mit Flüssigkeit ist nach erfolgter Befüllung der "Feinkornpremix" die Suspension bei hoher Werkzeuggeschwindigkeit (≥ 6 m/s) weiterhin 60 Sekunden durchzumischen.

Bevor mit dem Entleerprozess der Suspension begonnen wird, ist das letzte Drittel der Fließmittelmenge zuzugeben und rund 30 Sekunden einzumischen. Der Entleer- und in weiterer Folge stattfindende Befüllungsprozess in einen Chargenmischer wird ebenfalls mit jeweils 30 Sekunden prognostiziert.

Die Bestimmung der Zugabegeschwindigkeit der "Grobkorn-Stahlfaserpremix" erfolgt analog zur Bestimmung der Zugabegeschwindigkeit der "Feinkornpremix". Aus den Versuchen aus Kapitel 5.11 geht hervor, dass die maximale Dosiergeschwindigkeit für die Grobkornfraktion bei 2,19 kg/s liegt. Durch die Multiplikation mit dem Faktor 7 für den Großmischer ergibt sich eine Zugabegeschwindigkeit von $v_g = 15,33$ kg/s.

$$v_g = 2,19 \times 7,00 = 15,33 \text{ kg/s}$$

Bezogen auf die Menge des "Grobkorn-Stahlfaserpremix" ergibt sich daraus eine Dosierzeit von rund 37 Sekunden.

$$t_f = \frac{560}{15,33} = 36,53 \text{ s}$$

Für eine vollständige Verteilung der Grobkornpartikel und der Stahlfasern in der Bindemittelsuspension, ist das Mischgut anschließend für 60 Sekunden schonend ($\approx 1,5$ m/s) zu homogenisieren und der Mischer danach zu entleeren.

Die Gesamtmischzeit inkl. Entleerung (30 Sekunden) für das Prognosemodell beträgt 328 Sekunden bzw. knapp fünfeinhalb Minuten.

Der oben beschriebene zweistufige Mischprozess für die Erzeugung von UHPC ist in Abbildung 97 schematisch dargestellt.

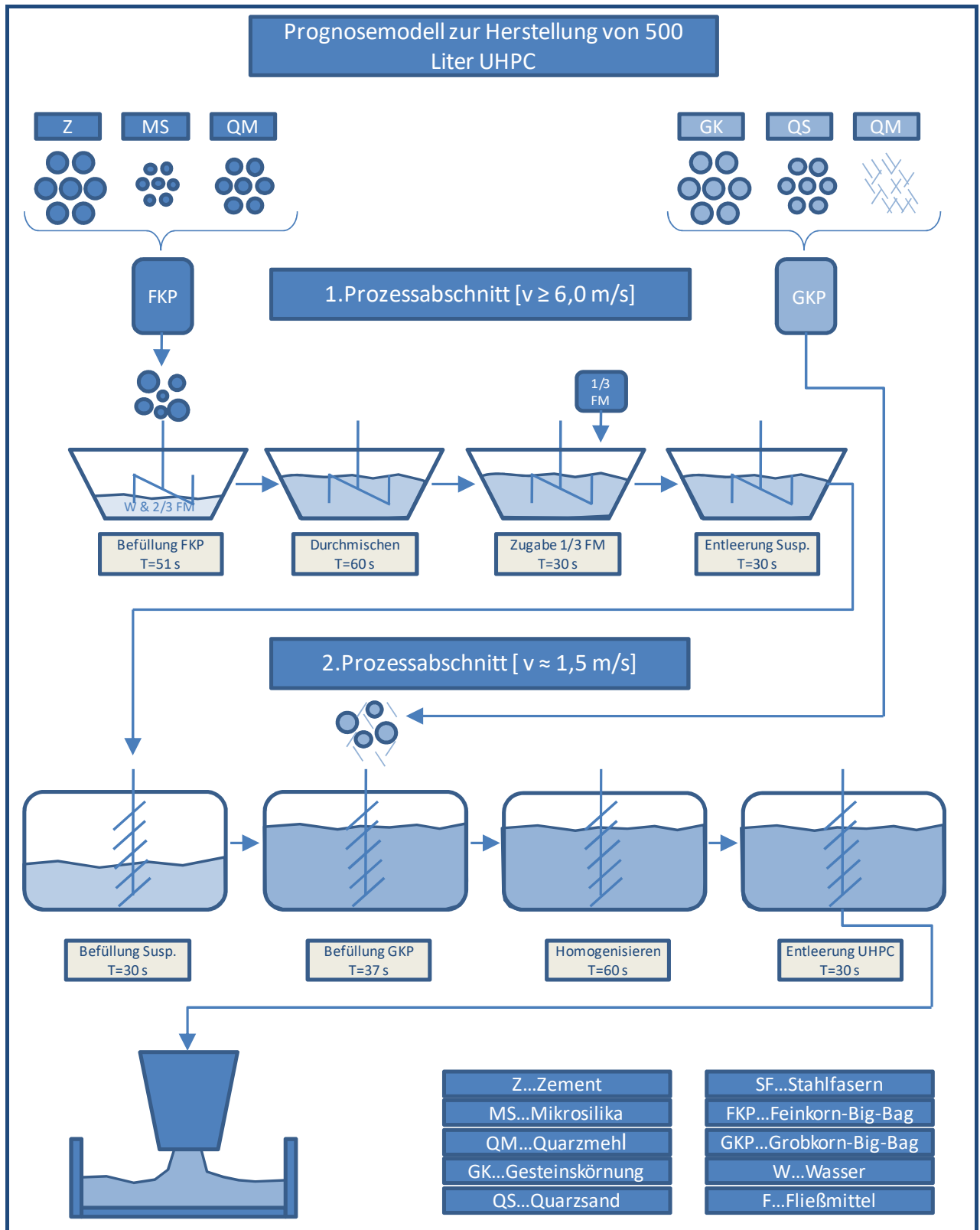


Abbildung 97 Schematische Darstellung eines optimalen Mischablaufs für die UHPC Erzeugung

8 Zusammenfassung

Der Baustoff Ultrahochleistungsbeton verfügt aufgrund seiner hohen Festigkeit und außerordentlichen Dauerhaftigkeit über spezielle Anwendungsmöglichkeiten. So kann durch die Verwendung von UHPC bei Bauteilen bzw. Bauwerken mit hohen lastinduzierten und korrosiven Beanspruchungen die Nutzungsdauer erhöht und damit die Kosten für Sanierungen reduziert werden.

Die besonderen Materialeigenschaften von UHPC resultieren vor allem im Übergang vom Drei- zum Fünf- bzw. Sechs-Stoff-Komponentensystem und in der damit verbundenen Erhöhung der Packungsdichte der Betonmatrix. Damit die angestrebten Betoneigenschaften (Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit etc.) tatsächlich erreicht werden, sind die verschiedenen Betonausgangsstoffe bestmöglich miteinander zu vermischen. Bestmöglich bezeichnet hierbei eine zufällige Verteilung sämtlicher Feststoffpartikel bei einer minimalen Anzahl von Störstellen (Agglomerate) und maximal möglicher Homogenität.

Da Ultrahochleistungsbetone im Vergleich zu Normalbetonen einen deutlich geringeren W/B-Wert besitzen sind für die UHPC-Erzeugung erhöhte Anforderungen an die Mischersysteme zu stellen. Der geringe W/B-Wert in Verbindung mit dem hohen Gehalt an Feinstteilen führt beim Mischen von UHPC zu einer verstärkten Ausbildung von Partikelzusammenschlüssen (Agglomeraten) die einerseits die Fließfähigkeit des Frischbetons und andererseits die Festigkeitseigenschaften des Betons reduzieren. Die Entstehung der Agglomerate und Granulate (Zusammenschluss mehrerer Agglomerate) führen während des Mischprozess durch die auftretenden Haftkräfte zu starken Widerstandskräften und erschweren somit die Platzwechselforgänge der Feststoffpartikel. Um diese Partikelzusammenschlüsse umfassend aufzulösen sind einerseits hohe Drehgeschwindigkeiten der Mischwerkzeuge zur Verteilung der Flüssigkeiten und andererseits besondere Anforderungen an die geometrische Ausbildung der Mischwerkzeuge zu stellen.

Die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie die Dauer des Mischprozesses werden neben der Auswahl der Betonausgangsstoffe und ihren Massenverhältnissen ebenso von der Zugabereihenfolge während des Mischprozesses beeinflusst. Hierbei führt ein zunehmendes Verhältnis zwischen dem Wasser- und Mehlkornvolumen (beeinflussbar durch den Wassergehalt und dem Verhältnis zwischen dem relativen und maximal möglichen Feststoffgehalt) zu einer verkürzten Mischzeit.

Durch den Gebrauch eines hybriden Mischablaufs (aufteilen des Dosierprozesses in mehrere Phasen) kann vor allem durch eine zweistufige Zugabe des Fließmittels die verflüssigende Wirkung gesteigert und die Dispergierung der feinen Partikel verstärkt werden. Neben der Zugabereihenfolge beeinflusst auch die Fließmittelart die Dauer des Mischprozesses. So werden Fließmittel mit hoher anionischer Ladungsdichte und einer Vielzahl von kurzen Seitenketten von den Bindemittelpartikeln früher adsorbiert, wodurch eine raschere verflüssigende Wirkung während des Mischprozesses eintritt.

Die an den unterschiedlichen Mischersystemen durchgeführten Mischversuche zeigten, dass die beiden 500 Liter Mischer die wasserarmen UHPC-Rezepturen mit dem gewählten Mischregime (Herstellung der Bindemittelsuspension + Einmischen des „Grobkorn-Premix“) aufgrund ihrer limitierten Motorleistung nicht herstellen konnten. Hierbei führte vor allem die schlagartige Entleerung des „Stahlfaser-Grobkorn-Premix“ in die Bindemittelsuspension dazu, dass beim Einmischen dieser, in beiden Fällen die Antriebsmotoren der Mischwerkzeuge aufgrund der hohen Widerstandskräfte im Mischgut an ihre Leistungsgrenzen gebracht wurden und anschließend ausfielen.

Die aufgetretenen Motorprobleme konnten durch den Wechsel zu einem Antriebsmotor mit höherem Drehmoment und gesteigertem Leistungsvermögen anschließend in einem zweiten Versuchsdurchgang überwunden werden.

Die Mischversuche an einem speziellen Suspensionsmischer (MAT-Gegenstrom-Intensivmischer) zeigten, dass durch dessen besondere Arbeitsweise (Ausbildung eines Flüssigkeitsstromes zwischen zwei unterschiedlichen Mischzonen) und den hohen Drehgeschwindigkeiten, die Feststoffpartikel rasch mit Fließmittelmolekülen benetzt und in der Flüssigkeit weiträumig dispergiert wurden. Des Weiteren konnte die zunächst optisch beurteilte hohe Homogenität der mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer hergestellten Bindemittelsuspension (frei von sichtbaren Agglomeraten) durch Versuche an der flüssigen (Ermittlung der Fließgrenze) und an der erhärteten (Ermittlung der Druck- und Biegezugfestigkeit) Suspension bestätigt werden. Im direkten Vergleich zwischen Bindemittelsuspensionen die mit anderen Mischsystemen (Eirich-Labor und Ultra Turrax T50) hergestellt wurden, wies die mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer erzeugte Bindemittelsuspension (auch wenn die Unterschiede nur geringfügig ausfielen) sowohl die geringste Fließgrenze als auch die höchsten Festigkeiten auf.

Der mit dem MAT-Gegenstrom-Intensivmischer hergestellte UHPC verdeutlichte die überdurchschnittliche Verflüssigungswirkung dieses Mixers und untermauert daher die mit diesem System erzielbare hohe Mischqualität. Aufgrund der starken Verflüssigungswirkung besteht somit Potenzial zur Einsparung von Fließmittel oder von Anmachwasser womit der W/B reduziert und die Festbetoneigenschaften gesteigert werden können.

Anhand des durchgeführten zweistufigen Mischprozesses (Herstellung der Bindemittelsuspension mittels Suspensionsmischer bzw. Einmischen der Grobkornfraktion in die Suspension mittels Eirich-Mischer) konnte ein optimaler Mischablauf gefunden werden mit dem sowohl UHPC in hoher Qualität, als auch mit geringer Motorbelastung und somit geringerer Störungsanfälligkeit produziert werden kann. Des Weiteren führt die schnelle Suspensionserzeugung und das schonende Einrühren der Grobkornpartikel zu einer eingeschränkten Erwärmung des Frischbetons und somit zu höheren Frischbetonqualitäten (Verarbeitbarkeit, reduzierter Rissgefahr während der Erhärtung etc.).

Da mit den beiden Mixchern eine unabhängige Produktion der Suspension und des Betons ermöglicht wird, liegt hier auch ein logistischer Nutzen vor. Dadurch ist vor allem für Großprojekte in denen eine kontinuierliche Betonproduktion über eine ausgedehnte Fertigungsperiode gefordert ist (z.B.:QUICKWAY), eine Mischzeitverkürzung erreichbar.

Auf Basis von Versuchen zur Dosiergeschwindigkeit unterschiedlich feiner Feststoffpartikel wurde darüberhinaus auch ein Modell zur Prognose der Chargenzeit für die Herstellung von 500 Liter UHPC entwickelt. Dadurch ist es möglich bereits im Vorfeld die Mischzeit von UHPC-Rezepturen abzuschätzen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Sparowitz & Quickwayteam, „QUICKWAY - Ein neues Mobilitätssystem für Städte,“ Graz, 2014.
- [2] L. Sparowitz, „Der Ausweg aus dem Chaos: Smart Traffic in Smart Cities: Das QUICKWAY Verkehrssystem,“ Graz.
- [3] L. Sparowitz, „QUICKWAY ist ein innovatives Konzept für die Mobilität von Menschen und leichten Gütern in großen Städten,“ Graz, 2014.
- [4] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher und S. Fröhlich, „Ultrahochfester Beton UHPC,“ in s *Betonkalender*, Kassel, Ernst & Sohn, 2013.
- [5] O. J. Mazanec, „Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen,“ Technische Universität München, München, 2012.
- [6] T. Teichmann, „Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein,“ Universität Kassel, Kassel, 2007.
- [7] N. V. Tue, „Vorlesungsunterlagen Betonbau GL,“ TU Graz, Graz, 2011.
- [8] M. M. Reichel, „Dünnwandige Segmentfertigteilbauweisen im Brückenbau aus gefasertem Ultrahochleistungsbeton (UHFB)-Tragverhalten, Bemessung und Konstruktion,“ Technische Universität Graz, Graz, 2010.
- [9] F. Dehn, „Herstellung, Verarbeitung und Qualitätssicherung von UHPC,“ in s *Ultra-Hochfester Beton - Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa*, Kassel, Universität Kassel, 2003.
- [10] [Online]. Available: <http://www.lafarge.at/zement/>. [Zugriff am 30 Mai 2016].
- [11] K. Safranek, „Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone,“ Technische Universität Wien, Wien, 2007.

- [12] Verein Deutscher Zementwerke e.V., Zement Taschenbuch 2002, 50.Ausgabe, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2002.
- [13] S. Kordts, „Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone,“ Technische Universität Berlin, Düsseldorf, 2005.
- [14] E. Fehling, M. Schmidt, T. Techmann, K. Bunje, R. Bornemann und M. Bernhard, „Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC),“ Universität Kassel, Kassel, 2005.
- [15] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM B 4710-1 Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
- [16] J. C. Scheydt, G. Herold und H. S. Müller, „Ultrahochfester Beton,“ in s *Innovationen in der Betonbautechnik - 3.Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Universität Karlsruhe*, Karlsruhe, Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, pp. 33-44.
- [17] E. Fischböck und P. Nischer, „Konrzusammensetzung des Mehlkorns-Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis,“ *Zement+Betton*, p. 2025, 5_2009.
- [18] J. Joachim, D. Gheorghe-Alexandru, N. Caludia, F. Gernot und M. Florian, „Ökologisch optimierter Beton: Stoffauswahl und Methoden der Rezeptentwicklung,“ in s *2.Grazer Betonkolloquium*, Graz, Technische Universität Graz, 2014, pp. 9-24.
- [19] M. Lins, „Verhalten von Ultrahochfesten Betonen (UHPC) unter Brandbeanspruchung,“ TU Wien, Wien, 2004.
- [20] W. Schmidt, „Wirkungsweise verschiedener Fließmittel,“ *BWI-BetonWerk International*, pp. 44-48, 3 2015.
- [21] Sika Deutschland GmbH, „Sika Visco Crete Technologie,“ sika Deutschland GmbH, Leimen, 2010.
- [22] B. Freytag und G. Santner, „Bemessung von Bauteilen aus faserbewehrtem UHPC -Zug, Druck, Biegung-,“ in *Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion; 2. Grazer Betonkolloquium*, Graz, Technische Universität Graz, 2014, pp.

73-86.

- [23] J. C. Walraven, „From Conventional to High Performance Steel Fibre Concrete,“ in *s Innovationen in der Bautechnik 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung*, Karlsruhe, Universitätsverlag Karlsruhe, 2006, pp. 23-32.
- [24] „<http://www.meinbezirk.at/villach-land/wirtschaft/nach-zwei-jahren-bauzeit-wird-zum-firmenjubilaeum-am-1-oktober-die-wild-bruecke-bei-voelkermarkt-eroeffnet-sie-ist-auch-die-neue-zufahrt-zum-unternehmen-m2514774,306405.html>,“ 13 Juni 2016. [Online].
- [25] „http://www.khp-leipzig.de/?page_id=213,“ 13 Juni 2016. [Online].
- [26] [Online]. Available: <http://ducon.eu/ducon-security>. [Zugriff am 29 Jänner 2017].
- [27] B. Sagmeister, „Maschineteile aus UHPC,“ in *3. Grazer Betonkolloquium*, Graz, Technische Universität Graz, 2016, pp. 201-209.
- [28] M. Kraume, *Mischen und Rühren - Grundlagen und moderne Verfahren*, Weinheim: WILEY-VCH GmbH & Co., 2003.
- [29] [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Homogenit%C3%A4t>. [Zugriff am 19 Mai 2016].
- [30] A. Schmandra, „Mischen von Sonderbetonen,“ *BFT*, pp. 20-26, Dezember 2005.
- [31] H. Schubert, *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik Band 2*, Freiberg: Wiley-Vch, 2003.
- [32] R. Weinekötter und H. Gericke, *Mischen von Feststoffen - Prinzipien, Verfahren, Mischer*, Zürich: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995.
- [33] [Online]. Available: <http://www.theiss-engineering.at/maschinen/mechanische-verfahrenstechnik/mischen/vertikaler-band-mischer/>. [Zugriff am 22 Februar 2017].
- [34] H. Schubert, „Untersuchungen zur Ermittlung von Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen,“

- Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1972.
- [35] C. Baumert und H. Garrecht, „Mischen von Hochleistungsbetonen,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, pp. 371-378, Juni 2010.
- [36] C. Baumert, „Rheometrische Mischprozessführung - Intensiv-Konus-Mischer mit integriertem Rheometer zur Herstellung von Hochleistungsbeton mit definierten rheologischen Eigenschaften,“ Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2012.
- [37] W. Müller, *Mechanische Verfahrenstechnik und Ihre Gesetzmäßigkeiten*, Dortmund: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2013.
- [38] H. Schubert, *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik Band 1*, Freiberg: Wiley-Vch, 2003.
- [39] [Online]. Available: [http://www.chemie.de/lexikon/Suspension_\(Chemie\).html](http://www.chemie.de/lexikon/Suspension_(Chemie).html). [Zugriff am 21 Juni 2016].
- [40] [Online]. Available: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/dispersion.glos.html>. [Zugriff am 20 Oktober 2016].
- [41] 26 Oktober 2016. [Online]. Available: http://www.mat-ooa.de/de/company/colloidal_mixing_technology.html.
- [42] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*, Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [43] [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>. [Zugriff am 14 Jänner 2017].
- [44] T. G. Mezger, *Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*, Hannover: Vincentz Network, 2012.
- [45] Schwegmannet, „http://www.schwegmannnet.de/PDF/Broschueren/Lack/DE/Rheologie_DE.pdf,“ [Online]. Available: http://www.schwegmannnet.de/PDF/Broschueren/Lack/DE/Rheologie_DE.pdf. [Zugriff am 10 August 2016].

- [46] [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Fluid. [Zugriff am 8 November 2016].
- [47] [Online]. Available: http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/bingham_00045_fluid.glos.html. [Zugriff am 8 November 2016].
- [48] H. Geier, „Den richtigen Dreh raushaben,“ *B+B Bauen im Bestand*, pp. 48-51, 2014 (2).
- [49] M. H. Pahl und A. Witting, „Mischen rühren und Dosieren,72,“ *Chemie Ingenieur Technik*, pp. 1451-1459, Dezember 2000.
- [50] K. Schwister und V. Leven, *Verfahrenstechnik für Ingenieure*, München: Carl-Hanser-Verlag, 2014.
- [51] M. Orgass und F. Dehn, „Einfluss der Mischtechnik bei Hochleistungsbetonen,“ *BFT International*, pp. 22-28, Jänner 2006.
- [52] M. Kleimeier, „Lastenheft: Gegenstrom-Intensiv-Mischer; Typenreihe:GIM,“ Immenstadt, 2015.
- [53] [Online]. Available: <http://www.loedige.de/global-content/processes/mischen/>. [Zugriff am 19 Februar 2017].
- [54] H. König, *Maschinen im Baubetrieb*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [55] [Online]. Available: <http://www.directindustry.de/prod/marcantonini-srl/product-62622-581069.html>. [Zugriff am 19 Februar 2017].
- [56] BHS-Sonthofen GmbH, „Doppelwellen-Chargenmischer setzen sich in den Fertigteilwerken durch,“ *BetonWerk International*, pp. 1-4, 02 2013.
- [57] C. F. Ferraris, „Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art,“ *Journal of Resaearch of the National Institute of Standards and Technology*, pp. 391-399, März-April 2001.
- [58] M. Müller, „Feststoffmischen,“ *Chemie Ingenieur Technik* 79, No.7, 2007.

- [59] [Online]. Available: http://www.g-ruberg.de/RUBERG-CMS/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=49. [Zugriff am 14 Jänner 2017].
- [60] Verein Deutscher Zementwerke e.V., „Betonieren bei extremen Temperaturen,“ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, 2014.
- [61] P. Lieblang und D. Ringwelski, „Einfluss des Mischens auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften,“ *BetonWerk International*, Juni 2012.
- [62] B. Daumann, S. Xiaoyan, H. Anlauf, S. Gerl und H. Nirschl, „Mixing Agglomeration in a High-Shear Mixer with a Stirred Mixing Vessel,“ *Chemical Engineering Technology*, pp. 321-326, No.2 33 2010 (33) No.2.
- [63] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 12350-7 Prüfung von Frischbeton Teil 7: Luftgehalt-Druckverfahren, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2009.
- [64] B. Cazacliu und N. Roquet, „Concrete mixing kinetics by means of power measurement,“ *Cement and Concrete Research* 39, pp. 182-194, 2009.
- [65] D. Chopin, B. Cazacliz, F. de Larrad und R. Schell, „Monitoring of concrete homogenisation with thr power consumption curve,“ *Materials and Structures*, 40, pp. 897-907, 2007.
- [66] D. Lowke, M. Pötz und P. Schießl, „Optimierung des Mischablaufs für selbstverdichtende Betone,“ *Beton*, pp. 614-617, 12 2005.
- [67] T. M. Vickers Jr., S. A. Farrington, J. R. Bury und L. E. Brower, „Influence of dipersant structure and mixing speed on concrete slump retention,“ *Cement and Concrete Research* 35, pp. 1882-1890, 2005.
- [68] O. Mazanec, D. Lowke und P. Schießl, „Optimierung des Mischprozesses ultra-hochfester Betone,“ in *s Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton*, Kassel, Univeristät Kassel, 2014, pp. 115-126.
- [69] D. Chopin, F. de Larrad und B. Cazacliu, „Why do HPC and SCC require a longer mixing time?,“ *Cement an Concrete Research*, 34, pp. 2237-2243, 2004.

- [70] O. Mazanec und P. Schießl, „Mixing Time Optimisation for UHPC,“ in s *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, Kassel, Universität Kassel, 2008, pp. 401-408.
- [71] C. Hu und F. de Larrad, „The rheology of fresh high-performance concrete,“ *Cement and Concrete Research*, pp. 293-294, Volume 26 1996.
- [72] O. Mazanec und P. Schiessl, „Improvement of UHPC properties through an optimized mixing procedure,“ in s *8th International symposium on utilization of high-strength an high-performance concrete*, Tokyo, 2008, pp. 307-313.
- [73] R. J. Flatt und Y. F. Houst, „A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers,“ *Cement and Concrete Research (31)*, pp. 1169-1176, August 2001.
- [74] P.-K. Chang und Y.-N. Peng, „Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete,“ *Cement and Concrete Research*, pp. 87-95, Jänner 2001 (Vol.31).
- [75] I. Schachinger, J. Schubert und O. Mazanec, „Effect of Mixing and Placement Methodes on Fresh an Hardened Ultra High Performance Concrete (UHPC),“ in s *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Universität Kassel, 2004, pp. 575-586.
- [76] J. Dils, G. De Schutter und V.Boel, „Influence of mixing procedure and mixer type on fresch and hardened properties of concrete: a review,“ *Materials and Structures* , 2012.
- [77] J. Kirnbauer, „Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Ultra High Performance Concrete,“ Technische Universität Wien, Wien, 2013.
- [78] K. Zilch, C. J. Diederichs, R. Katzenbach und K. J. Beckmann, *Bauwirtschaft und Baubetrieb*, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [79] Skako Concrete, „Skako Concrete Rotoconix - Der ultimative Betonmischer“.
- [80] Steine+Erden, „Vorstellung des aktuellen Betonmischers,“ *Steine+Erden*, 4/2013.

- [81] [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=4X4yx7_pawo. [Zugriff am 10 September 2016].
- [82] Kniele Baumaschinen GmbH, „Kniele Mischtechnik,“ Bad Buchau.
- [83] Kniele Baumaschinen GmbH, „Betriebsanleitung für KKM-Mischer,“ Bad Buchau, 2015.
- [84] H. Garrecht und C. Baumert, „Innovative Mischkonzepte für die praxisergerechte Herstellung von Hochleistungsbetonen mit Standardmischanlagen,“ *BetonWerk International*, pp. 60-69, August 2009.
- [85] Kniele Baumaschinen GmbH, „Der Konusmischer auf dem Betonsektor,“ Bad Buchau.
- [86] Kniele Baumaschinen GmbH, 17 August 2016. [Online]. Available: <https://www.kniele.de/index.php/de/mischersysteme/konusmischer>.
- [87] 29 Oktober 2016. [Online]. Available: <http://www.mat-oa.de/export/sites/www.mat-oa.de/pdf/MAT-BAUER-GIM-50-2015-10.26-de-web.pdf>.
- [88] D. Heuer, „Eine ganz andere Mischtechnik,“ *BFT International*, 01/2011.
- [89] P. Nold, „Mischtechnik - worauf kommt es an?,“ Heidelberg Betonage, Hardheim, 2010.
- [90] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 12350-8 Prüfung von Frischbeton Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2010.
- [91] K. Bergmeister, F. Fingerloos und J.-D. Wörner, Beton-Kalender 2009 - Konstruktiver Hochbau Aktuelle Massivbaunormen, Berlin: Ernst & Sohn, 2009.
- [92] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 12350-5 Prüfung von Frischbeton Teil 5: Ausbreitmaß, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2009.
- [93] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 12350-6 Prüfung von Frischbeton Teil 6: Frischbetonrohddichte, Wien:

Österreichisches Normungsinstitut, 2009.

- [94] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 12390-3 Prüfung von Festbeton Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2012.
- [95] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 12390-5 Prüfung von Festbeton Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2009.
- [96] [Online]. Available: www.germansucon.net. [Zugriff am 11 März 2017].

