

TU Technische Universität Wien

Diplomarbeit Master`s Thesis

Einfluss unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Eigenschaften vakuumgemischter ultrahochfester Betone

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

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Kirnbauer

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit
der Technischen Universität Wien
eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieure

von
Ludwig Rossbacher

0325496

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von September 2009 bis März 2010 als Diplomarbeit am Institut für Hochbau und Technologie der Technischen Universität Wien und wurde von der dortigen Fakultät für Bauingenieurwesen angenommen.

Ich danke *O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider* für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an diesem Institut durchzuführen und weiters dafür, dass mir die Laboreinrichtung und die Baustoffe zur Verfügung gestellt wurden.

Weiters danke ich meinem Betreuer *Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Kirnbauer* für seine fachliche Unterstützung sowie seine zahlreichen Anregungen, die wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt ebenso *Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner* und *Ing. Karin Fussenegger* für ihre fachliche Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten und mich in allen meinen Plänen und Vorhaben unterstützen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Thema und Ziele der Arbeit	1
1.3	Aufbau der Arbeit	2
2	Herstellung und Eigenschaften von UHPC	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Inhaltsstoffe des Betons	3
2.2.1	<i>Zement</i>	3
2.2.2	<i>Gesteinskörnungen (Zuschläge)</i>	5
2.2.3	<i>Anmachwasser</i>	8
2.2.4	<i>Zusatzstoffe</i>	8
2.2.5	<i>Zusatzmittel</i>	12
2.2.6	<i>Wasser-Bindemittelwert</i>	15
2.3	Chemische Vorgänge beim Erhärten des Betons	16
2.3.1	<i>Hydratationsreaktionen</i>	18
2.3.2	<i>Hydratationsgrad</i>	19
2.4	Betoneigenschaften	21
2.4.1	<i>Rohdichte und Luftgehalt</i>	21
2.4.2	<i>Druckfestigkeit</i>	24
2.4.3	<i>Zugfestigkeit</i>	27
2.4.4	<i>Konsistenz</i>	28
3	Versuchsaufbau	31
3.1	Vorbemerkung	31
3.2	Mischen von UHPC :	31
3.2.1	<i>Das Eirich-Mischprinzip</i>	32
3.2.2	<i>Leistungseintrag des Mischers</i>	34
3.3	Vakuummischen	35
3.3.1	<i>Begriffserklärung Vakuum</i>	35
3.3.2	<i>Herstellung von Vakua</i>	36
3.3.3	<i>Vakuumpaktanlage der Fa. Sterling</i>	37
3.4	Zusammensetzung der UHPC-Mischung	40

3.4.1	Zement	40
3.4.2	Gesteinskörnung	42
3.4.3	Betonzusatzstoffe	43
3.4.4	Betonzusatzmittel	45
3.5	Die prinzipielle Mischreihenfolge	45
3.6	Frischbetonprüfungen.....	46
3.6.1	Ermittlung des Luftgehalts	46
3.6.2	Ermittlung der Rohdichte	47
3.6.3	Ermittlung des Ausbreitmaßes.....	47
3.7	Schalung der Probekörper.....	48
3.8	Nachbehandlungen	49
3.8.1	Nachbehandlung in Anlehnung an die ÖNORM EN B 3303.....	51
3.8.2	Nachbehandlung an der Raumluft.....	51
3.8.3	Warmwasserlagerung.....	51
3.8.4	Ofenwarmbehandlung 1, 90°C	52
3.8.5	Ofenwarmbehandlung 2, 250°C	52
3.8.6	Warmwasser- plus Ofenwarmbehandlung.....	52
3.8.7	Darstellung aller Nachbehandlungen.....	53
3.9	Festbetonprüfungen	54
3.9.1	Festbetonrohddichte	54
3.9.2	Biegezugversuch	54
3.9.3	Spaltzugfestigkeit	56
3.9.4	Druckfestigkeit.....	57
3.9.5	Quecksilber-Porosimetrie:	58
4	Vorversuch.....	64
4.1	Allgemeines	64
4.2	Vorversuchsdurchführung	64
4.2.1	Mischungsberechnungen und Sieblinien, Vorversuch:.....	64
4.2.2	Frischbetonprüfungen, Vorversuch.....	71
4.2.3	Festbetonprüfungen, Vorversuch	73
4.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse, Vorversuch	74
5	Hauptversuche	75
5.1	Allgemeines	75
5.2	Prüfplan	75

5.3	Mischrezeptur der Hauptversuche.....	77
5.4	Frischbetonergebnisse:	78
5.4.1	<i>Ausbreitmaß</i>	78
5.4.2	<i>Frischbetonrohddichte</i>	79
5.4.3	<i>Frischbetonluftgehalt</i>	80
5.5	Festbetonversuchsergebnisse.....	80
5.5.1	<i>Festbetonrohddichte</i>	81
5.5.2	<i>Biegezugfestigkeit</i>	88
5.5.3	<i>Spaltzugfestigkeit</i>	94
5.5.4	<i>Druckfestigkeit</i>	100
5.5.5	<i>Porosität</i>	105
5.6	Zusammenhänge und Interpretation.....	116
5.6.1	<i>Ausbreitmaß und Luftgehalt</i>	116
5.6.2	<i>Frischbetonrohddichte und Luftgehalt</i>	117
5.6.3	<i>Vergleich der Festbetondichten aller Nachbehandlungen</i>	118
5.6.4	<i>Vergleich der Biegezugfestigkeiten aller Nachbehandlungen</i>	120
5.6.5	<i>Vergleich der Spaltzugfestigkeiten aller Nachbehandlungen</i>	123
5.6.6	<i>Vergleich der Druckfestigkeiten aller Nachbehandlungen</i>	126
5.6.7	<i>Vergleich der Entwicklungen der Biegezugfestigkeiten, Spaltzugfestigkeiten und Druckfestigkeiten</i>	129
5.6.8	<i>Vergleich der Gesamtporosität mit den Druckfestigkeit</i>	135
5.7	Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse	136
6	Zusammenfassung und Ausblick	141
6.1	Zusammenfassung	141
6.2	Ausblick	143
7	Summary	144
8	Literaturverzeichnis	145

1 Einleitung

1.1 Motivation

Aufgrund des Bestrebens im Bauwesen nach immer höheren, schlankeren und spektakulären Konstruktionen, wird der Ruf nach entsprechend leistungsfähigen Materialien immer lauter. Beton hat sich für viele Bauvorhaben bereits als Standardmaterial etabliert, das in höchst unterschiedlichen Variationen existiert und sich sowohl bei Architekten und Planern, als auch bei Bauherrn einer sehr großen Beliebtheit erfreut. Nun wird versucht mit sogenannten Hochleistungsbetonen dem Stahl und anderen Baustoffen, die im Vergleich zu Beton üblicherweise überlegene Zugfestigkeitseigenschaften besitzen, Konkurrenz zu machen. Dabei will man durch die Verwendung von sehr leistungsfähigen Betoninhaltsstoffen, durch bis ins kleinste Detail festgelegte Mischabläufe und durch sorgfältige Nachbehandlungen Betonfestigkeiten erzielen, die dem Vielfachen der eines Normalbetons entsprechen. Die Entwicklung des UHPC (englisch, Ultra High Performance Concrete) begann mit der Mischung von Betonen mit ausschließlich feinkörniger und reaktiver Zusammensetzung. Diese Art von Beton wird deshalb auch als RPC (englisch, Reactive Powder Concrete) bezeichnet. Das Potential solcher Hochleistungsbetone ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Materialforscher an vielen renommierten Universitäten auf der ganzen Welt versuchen die Möglichkeiten von Hochleistungsbetonen, nicht nur in Bezug auf die Festigkeiten, sondern auch auf andern Ebenen, auszuloten.

1.2 Thema und Ziele der Arbeit

Die Arbeit *„Einfluss unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Eigenschaften vakuumgemischter ultrahochfester Betone“* erweitert eine Reihe von Diplomarbeiten, die am Institut für Hochbau und Technologie an der TU Wien verfasst wurden, über ultrahochfeste Betone, die mit *„Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone“*, von Karin Safranek im Jahr 2007 begonnen und mit *„Einfluss des Vakuummischprozesses auf ausgewählte Eigenschaften ultrahochfester Betone“* von Matthias Berger im Jahr 2008 [8] fortgeführt wurde. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist ein Vergleich ausgewählter Eigenschaften von Betonen, die jeweils immer die gleiche Rezeptur besitzen, auf die

gleiche Weise hergestellt werden, sich aber in ihrer Nachbehandlung unterscheiden. Hauptaugenmerk wird hierbei auf die unterschiedlichen Festigkeitsentwicklungen während der Nachbehandlungsperiode gelegt. Die ausgewählten Eigenschaften werden mit Frischbetonversuchen und Festbetonversuchen quantitativ erfasst und die Ergebnisse gegenübergestellt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Diplomarbeit unterteilt sich wie folgt, (siehe Abbildung 1.1):

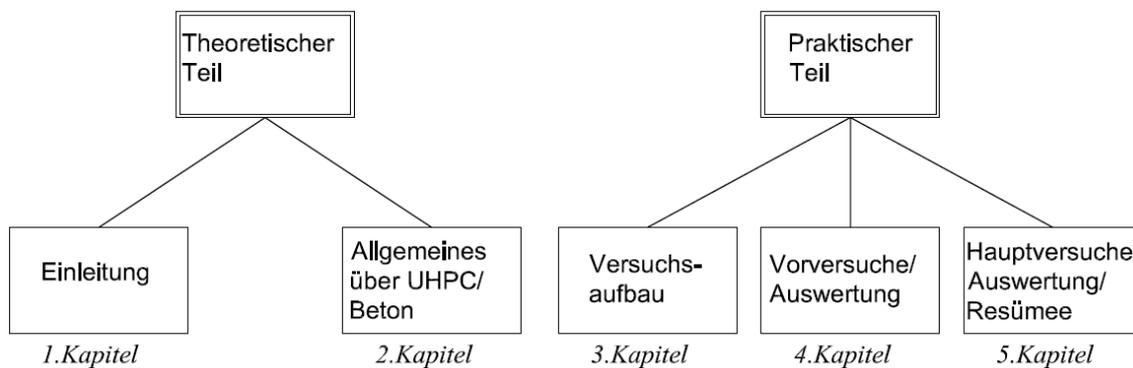


Abbildung 1.1: Aufbau der Diplomarbeit

Der theoretische Teil befasst sich mit einer allgemeinen Beschreibung des Begriffes UHPC, wobei auch die Hauptunterschiede zu Normalbeton näher betrachtet werden. Weiter folgen Erläuterungen zu den Inhaltsstoffen, deren Besonderheiten und Wirkungsweisen bzw. den Zweck des Hinzufügens zum Beton. Ein weiteres Unterkapitel befasst sich mit den chemischen Reaktionen, die während des Erhärtens des Betons stattfinden, mit Blick auf die Auswirkungen und den Einfluss durch verschiedene Nachbehandlungsmethoden. Es folgt eine Übersicht von ausgewählten Eigenschaften des Betons, die im Verlauf der Versuchsausführung untersucht werden.

Im praktischen Teil wird anfangs die Herstellungs- bzw. die Mischmethode des ultrahochfesten Betons, der in dieser Arbeit verwendet wird, genau beschrieben. Unter anderem wird die Methodik des Vakuummischens genauer durchleuchtet. Nachfolgend werden die konkret für die Versuche in dieser Arbeit benutzten Betoninhaltsstoffe analysiert und beschrieben. Anschließend wird auf die Versuche und die dabei benutzten Gerätschaften genauer eingegangen. Im Kapitel 4 ist der den Hauptversuchen vorangegangene Vorversuch beschrieben und schließlich werden im 5. Kapitel die Hauptversuche und deren Auswertungen behandelt.

2 Herstellung und Eigenschaften von UHPC

2.1 Allgemeines

Als ultrahochfester Beton wird Beton bezeichnet, der Druckfestigkeiten oberhalb der in ÖNORM B 4710-1 definierten Festigkeitsklasse C100/115 erreicht. Diese Festigkeiten werden erst durch den Übergang von einem 3-Phasen-Werkstoff aus Wasser, Zement und Zuschlag, in ein 5-Stoff-System aus Wasser, Zement, Zuschlag und außerdem Zusatzstoffe und Zusatzmittel möglich. Diese 2 zusätzlichen Komponenten, auf die im Folgenden noch näher eingegangen wird, ermöglichen eine effektivere Gestaltung der Betonparameter. Bei optimierter Zusammensetzung und unter Einhaltung spezieller Qualitätssicherungsmaßnahmen sind Druckfestigkeiten bis zu 250 N/mm² auch unter baupraktischen Bedingungen wiederholt zu erreichen. Technologische Besonderheit von UHPC ist eine extrem hohe Gefügedichte, die bei optimaler Herstellung und Nachbehandlung fast keine Poren und Mikrorisse aufweist.

2.2 Inhaltsstoffe des Betons

2.2.1 Zement

Zement ist ein anorganischer, nichtmetallischer, feingemahlener Stoff, der unter Zugabe von Wasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser, nach einer gewissen Zeit aushärtet und dann als fest und raumbeständig bezeichnet werden kann. Zement wird deshalb zu den hydraulischen Bindemitteln gezählt, welche unter Wasserzugabe unlösliche, stabile, chemische Verbindungen eingehen. Im Fall von Zement sind diese Verbindungen Calciumhydrate, die feine nadelförmige Kristalle ausbilden, die sich untereinander verzahnen und so die hohe Festigkeit des Betons oder Zementmörtels bewerkstelligen [1].

Ausgangsstoff für Zement sind in Steinbrüchen abgebaute Rohstoffe wie Kalkstein, Ton, Sand und Eisenerz die zusammen gemahlen und getrocknet werden. Dieses Rohmehl wird anschließend bei 1450°C zu Zement-Klinker gebrannt. Dieser so genannte Klinker wird unter Zugabe von Anhydrit oder Gips zum fertigen Produkt, dem Zement vermahlen. Durch die Zugabe von weiteren Zusatzstoffen wie Hüttensand, Puzzolan, Flugasche oder Kalkstein können die Eigenschaften des Zements verändert bzw. verbessert werden. In Abbildung 2.1 ist der Herstellungsprozess von Zement dargestellt.

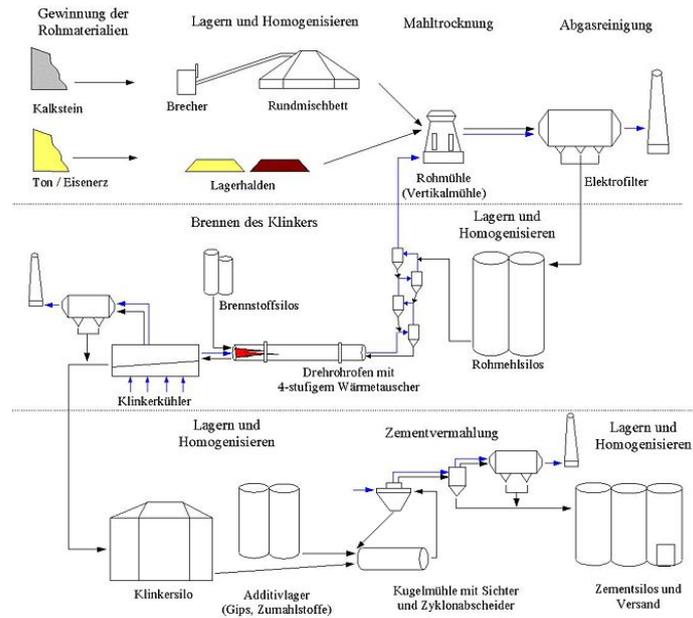


Abbildung 2.1: Herstellung von Zement

Im Zusammenhang mit ultrahochfestem Beton werden hauptsächlich Zemente verwendet, die einen geringen Wasseranspruch und eine gute Verträglichkeit mit den Zusatzstoffen haben. Aus diesem Grund kommen bei UHPC hauptsächlich Portlandzemente zum Einsatz, welche einen geringen C_3A -Gehalt (Tricalciumaluminat) aufweisen. Dadurch wird eine gute Verarbeitbarkeit des Betons erreicht [2].

Der Zementgehalt von ultrahochfesten Betonen liegt zwischen 400 und 1000kg/m^3 (zum Vergleich: Normalbeton ca. 240kg/m^3). Der Zementgehalt hängt stark von den weiteren Betonzuschlagstoffen und deren Reaktivität ab. Zu beachten ist, dass bei hohen Zementgehalten die Hydratationswärme sehr hoch werden kann, was dazu führt, dass in Folge des Temperaturgefälles im Beton thermisch bedingte Zwangsspannungen auftreten, die wiederum Mikrorisse im Gefüge bewirken [3], [4].

In Tabelle 2.1 sind alle erhältlichen Zementarten, deren Bezeichnungen und deren Portlandzementanteil eingetragen.

Tabelle 2.1: Zementarten und –Bezeichnungen [5]

Zementart	Benennung	Kurzzeichen	Anteil an Portlandzementklinker[%]
CEM I	Portlandzement	CEM I	95 bis 100
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80 bis 94
		CEM II/B-S	65 bis 79
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	80 bis 94
		CEM II/B-P	65 bis 79
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	80 bis 94
	Portlandölschieferzement	CEM II/A-T	80 bis 94
		CEM II/B-T	65 bis 79
Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	80 bis 94	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35 bis 64
		CEM III/B	20 bis 34
CEM IV	Puzzolanzement	CEM IV/A	65 bis 89
		CEM IV/B	45 bis 64
CEM V	Kompositzement	CEM V/A	40 bis 64
		CEM V/B	20 bis 39

2.2.2 Gesteinskörnungen (Zuschläge)

Die Gesteinszuschläge machen im Beton ungefähr 70% des Gesamtvolumens aus und stellen somit den mit Abstand größten Anteil im Beton. Bei ultrahochfesten Betonen ist den Eigenschaften und der Zusammensetzung der Gesteinskörnung besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Da der Beton immer seine Leistungsgrenze beim Versagen des schwächsten Elements erreicht, und ultrahochfester Beton eine Zementmatrix mit extrem hoher Festigkeit aufweist, müssen als Zuschlag ebenfalls Gesteinskörnungen mit möglichst hoher Festigkeit verwendet werden. Hinsichtlich der Verwendung von Gesteinskörnungen für ultrahochfesten Beton ist die ÖNORM EN 12620 zu beachten. In Tabelle 2.2 sind ausgewählte Gesteinsarten, die als Gesteinskörnung für Beton in Frage kommen, samt einigen Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 2.2: Eigenschaften von Gesteinen

Gesteinsart	Wasseraufnahme nach DIN 52 103 [N.13] Gew.-%	Druckfestigkeiten nach DIN 52 103 [N.13] N/mm ²	E-Modul kN/mm ²
Granit	0,2-0,5	160-210	35-76
Diorit/Gabbro	0,2-0,4	170-300	50-60
Basalt	0,1-0,3	250-400	96($\rho=3,05$)
Quarzit/Grauwacke	0,2-0,5	150-300	60($\rho=2,65$)
Sandstein	0,2-9,0	30-200	1,5-20

Neben der Druckfestigkeit ist auch der E-Modul der Gesteinskörnung eine wichtige Kenngröße die beachtet werden muss. Je höher der E-Modul des Betonzuschlages, desto höher kann auch der E-Modul des Betons sein. Das wiederum bewirkt eine erhöhte Aufnahmefähigkeit von Verformungen die aus Kriechen, Schwinden und Temperaturdifferenzen stammen.

Prinzipiell bestimmt die Kornzusammensetzung des Betonzuschlages die Dichte und den Wasseranspruch der Betonmischung, der zum Erreichen einer ausreichenden Verarbeitbarkeit nötig ist. Die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnungen für Normalbeton wird durch Siebversuche mit Prüfsieben bestimmt und in Siebliendiagrammen dargestellt, welche den Anteil des Zuschlages in Gewichtsprozenten zeigen, der kleiner als die zugehörige Korngröße ist. Ziel ist es, eine möglichst dichte Packung der Gesteinskörnungen zu erreichen, um möglichst wenig Zementleim zum Ausfüllen der verbleibenden Hohlräume zu benötigen. Abbildung 2.2 zeigt wie ein Siebliendiagramm von vier unterschiedlichen Gesteinskörnungen aussieht.

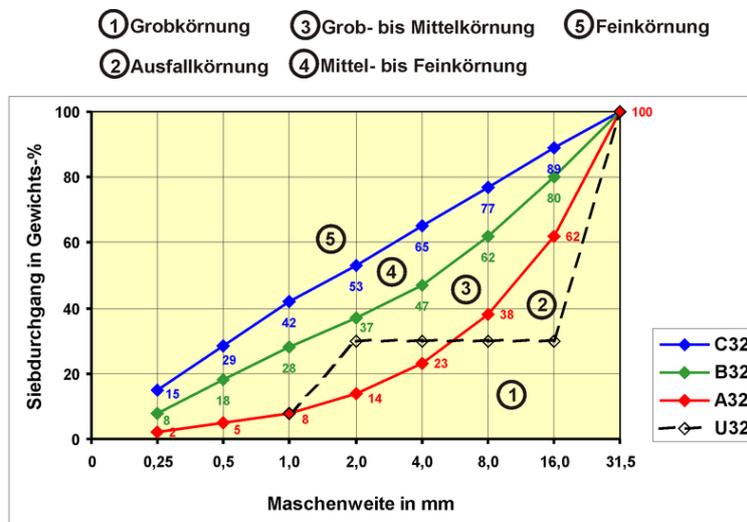


Abbildung 2.2: Beispiel einer Sieblinie [6]

Bei Ultra-Hochleistungsbetonen muss für die optimale Kornzusammensetzung die Kornverteilung genauer betrachtet werden.

W.A. Fuller stellte anhand seiner Untersuchungen über die Kornverteilungen fest, dass eine Optimierung der Dichte der Gesteinspackung dadurch gesichert werden kann, indem jeder Zwischenraum einer Gesteinskörnung mit einem kleineren Korn gefüllt wird. Es muss die Kornabstufung so gewählt werden, dass keine Teilchenbehinderung stattfindet. Dadurch wird gewährleistet, dass die kleineren Teilchen in alle Zwischenräume hineingelangen. Eine Optimierung, bei der das Größtkorn einer Gesteinsmischung durch mehrere kleinere Körnungen ersetzt wird, heißt Homogenisierung.

Eine optimale Kornzusammensetzung lässt sich mit folgender Formel nach *W.A.Fuller* errechnen [7].

$$A(d) = \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^q \quad \text{Gl. (2.1)}$$

mit:

A(d)=Massenanteil von Korndurchmesser kleiner *d*, bezogen auf die Gesamtmasse

d_{max} = Größtkorndurchmesser des Korngemisches

d= Korndurchmesser ($0 \leq d \leq d_{max}$)

q= Körnungsexponent

Mit $q=0,5$ ergibt sich die *Fuller-Parabel*, die als Idealsieblinie angesehen wird.

Aufgrund der in ultrahochfesten Beton vorkommenden sehr geringen Korngrößen, musste die Formel an die neuen Randbedingungen angepasst werden, um zufrieden stellende Ergebnisse zu erzielen [8].

$$A(d) = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,1}{d_{max}} \right)^{0,5}} \cdot \left[\left(\frac{d}{d_{max}} \right)^{0,125} - \left(\frac{0,1}{d_{max}} \right)^{0,125} \right] \quad \text{Gl. (2.2)}$$

mit:

A(d)=Massenanteil von Korndurchmesser kleiner *d*, bezogen auf die Gesamtmasse

d_{max} = Größtkorndurchmesser des Korngemisches

d= Korndurchmesser ($0 \leq d \leq d_{max}$)

Für ultrahochfesten Beton wird hauptsächlich Zuschlag mit Korngrößen zwischen 250 µm und 1 mm verwendet. Durch diese Feinheit des Korngemisches wird die oft

sehr poröse und heterogene Übergangszone zwischen Zuschlagskorn und Zementleim zu einem großen beseitigt.

2.2.3 Anmachwasser

Das Anmachwasser ist das Wasser, das benötigt wird um den Abbindeprozess des Betons in Gang zu bringen und um den Beton verarbeiten bzw. in die Schalung einbringen und verdichten zu können. Im Allgemeinen kann jedes in der freien Natur vorkommende Wasser als Anmachwasser verwendet werden, sofern es nicht mit diversen Ölen, Fetten, Salzen, Säuren oder Zucker verunreinigt ist. Meerwasser ist deshalb ebenso wie Moorwasser als Anmachwasser gänzlich ungeeignet, da die Inhaltsstoffe schädliche Reaktionen im Beton auslösen können. Die Gesamtwassermenge setzt sich zusammen aus der Feuchte der verwendeten Gesteinskörnung, den Wasseranteilen der Zementzusatzmittel/-stoffe und dem Zugabewasser.

2.2.4 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe sind flüssige oder pulverförmige Zusätze in der Betonmischung die gewisse Eigenschaften des Betons verändern können. Grundbedingung für die Zugabe solcher Zusatzstoffe ist, dass sie unter keinen Umständen das Erhärten des Zements, die Festigkeit des Betons, die Dauerhaftigkeit des Betons oder den Korrosionsschutz der Bewehrung negativ beeinflussen dürfen.

Die Einteilung und die Anwendung der Zusatzstoffe sind in der ÖNORM EN 206 geregelt. Hierin sind die Zusatzstoffe getrennt in inerte Zusatzstoffe sowie in latenthdraulische Zusatzstoffe. Meist werden die Zusatzstoffe anteilig in den Wasser-Bindemittelwert (siehe Abschnitt 2.2.6) eingerechnet. Es werden im Allgemeinen folgende Zusatzstoffe zugeführt, wobei anschließend auf zwei näher eingegangen wird:

- Mineralische Feinstoffe, wie zum Beispiel Silica-Staub (Microsilica), Steinkohlenflugasche, Tuffe
- Organische Stoffe, wie z.B. Kunstharzdispersionen
- Fasern, wie z.B. Stahldrahtfasern, Kohlenstofffasern, Polypropylenfasern, etc.
- Farbpigmente

2.2.4.1 Microsilica

Silica-Staub wird in Form von Microsilica oder Nanosilica der Betonmischung zugefügt. Dieser fällt als Abfallprodukt in der Siliciummetall- und Ferrosiliciumproduktion als kondensierter Filterstaub an und wird mittels Elektrofiltern aus den Rauchgasen gewonnen. Die so gewonnenen Partikel sind 30 bis 100 mal kleiner als die Zementkörper und haben nur einen mittleren Durchmesser von ca. $0,1\mu\text{m}$ [10]. Der mit Silicastaub versetzte Beton wird durch drei Effekte in seinen Festigkeitseigenschaften verbessert [9].

1. Durch die geringe Gestalt und Größe der Silicapartikel können sie hervorragend die Porenräume zwischen den Zementkörpern bzw. der Gesteinskörnungen ausfüllen. Dadurch wird die Packungsdichte und somit die Homogenisierung des Gefüges verbessert (Mikrofüllereffekt). Abbildung 2.3 zeigt den Größenunterschied zwischen einem Zementkorn und einem Silicastaubkörper.

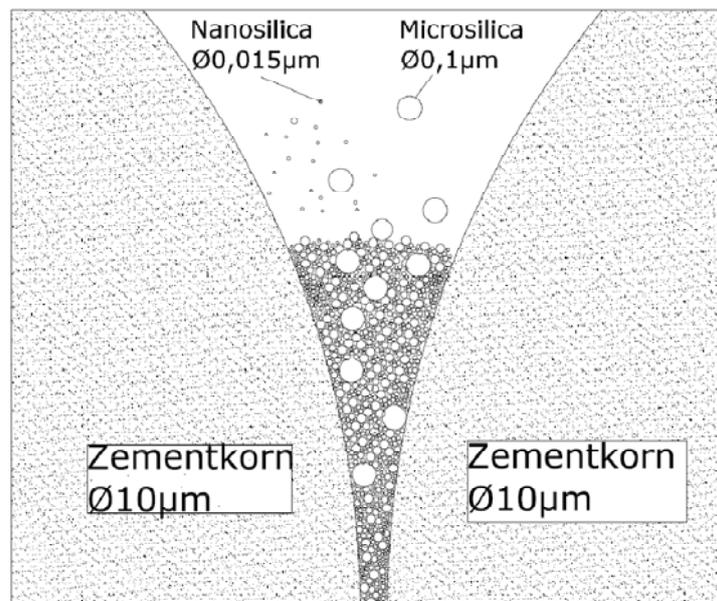


Abbildung 2.3: Größenunterschied Silicastaub und Zementkörper

2. Zusätzlich zur Zementhydratation läuft eine puzzolanische Sekundärreaktion zwischen dem bei der Zementhydratation entstehendem Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und dem Silikastaub SiO_2 ab. Hierbei wird Calciumsilikahydrat CSH gebildet, das gegenüber den Ausgangsstoffen eine höhere Festigkeit aufweist, siehe Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5.

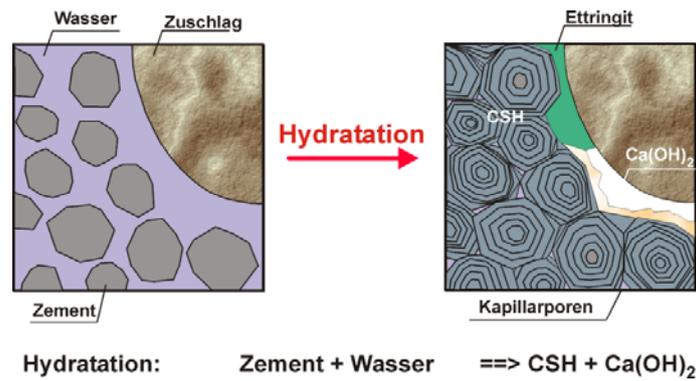


Abbildung 2.4: Hydratation von Normalbeton

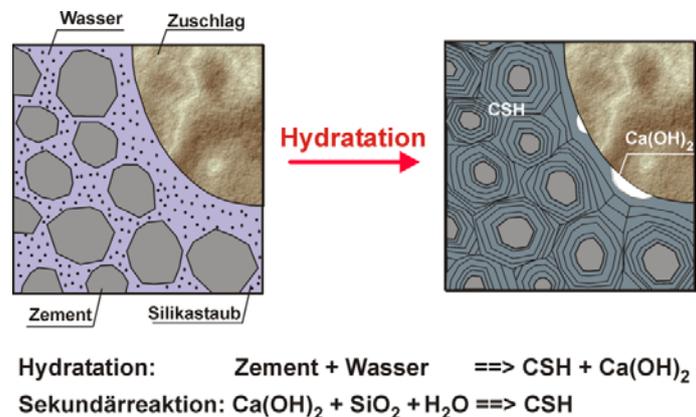


Abbildung 2.5: Hydratation von UHPC

- Ein weiterer wichtiger Effekt, der zur Festigkeitssteigerung beiträgt, entsteht dadurch, dass der Calcium- und Ettringitgehalt in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung erheblich reduziert wird. Damit wird die Mikrostruktur in der Verbundzone verbessert [11].

2.2.4.2 Fasern

Fasern werden vor allem im Zusammenhang mit ultrahochfesten Betonen als Betonzusatzstoffe eingesetzt. Hauptaugenmerk wird hier zum einen auf eine Verbesserung der Duktilität des spröden Hochleistungsbetons, und zum anderen auf eine Steigerung des Brandwiderstands gelegt.

Als praxistauglich haben sich vor allem Stahl- und Kunststofffasern bzw. Kohlenstofffasern erwiesen, es werden aber auch vereinzelt Fasern aus Jute, Hanf, Kokosnuss, Zuckerrohr oder Zellulose verwendet. Eine Übersicht über die Eigenschaften gebräuchlicher Fasern ist in Tabelle 2.3 dargestellt.

Tabelle 2.3: Eigenschaften gebräuchlicher Fasern für UHPC [12]

Faserart	Faser-durchmesser	Faser-länge	E-Modul	Zugfestigkeit	Bruch-dehnung	Preis
	µm	mm	kN/mm ²	N/mm ²	[%]	€/kg
Stahlfasern:						
-Stahldrahtfasern	500 bis 1300	30 bis 60	160 bis 210	>1000	3 bis 4	1 bis 5
-Spanfasern	400	26 bis 32	210	980	10	1 bis 6
-Blechfasern	400 bis 650	15 bis 35	210	270 bis 800	10	1 bis 7
AR-Glasfasern	3 bis 30	3 bis 25	72 bis 75	1500 bis 1700	1,5 bis 2,4	7 bis 15
Polypropylenfasern:						
-monofil	18 bis 22	6 bis 18	4 bis 18	320 bis 560	8 bis 20	5 bis 15
-fibrilliert	50 bis 100	6 bis 19	3,5 bis 10	320 bis 400	5 bis 15	5 bis 15
Polyacrylnitrilfasern	18 bis 104	4 bis 24	15 bis 20	330 bis 530	6 bis 20	4 bis 12
Kohlenstofffasern	5 bis 10	6	150 bis 450	2600 bis 6300	0,4 bis 1,6	>20
Aramid	10	6 bis 65	70 bis 130	2700 bis 3600	2,1 bis 4,0	>30

Durch das Hinzufügen von Fasern zum Beton werden im Wesentlichen drei Ziele verfolgt:

1. Die Verhinderung von Schwindrissen.
2. Das Erreichen eines duktilen Verhaltens nach Überschreitung der Maximaltraglast (Fließgelenkausbildung).
3. Die Verhinderung von Abplatzungen am Beton im Brandfall.

Es ist aber auch möglich, mithilfe von Fasern die Wärmeleitfähigkeit des Betons zu verändern, oder durch das Einlegen von Glasfasermatten einen transluzenten Beton (Litecon genannt) mit einer Lichtdurchlässigkeit von bis zu 4% herzustellen. Um mehrere dieser Eigenschaften in einem Beton zu vereinen, ist meistens ein Fasercocktail aus mehreren Fasern notwendig [1]. In Abbildung 2.6 ist eine Auswahl gebräuchlicher Fasern dargestellt. Abbildung 2.7 zeigt die Lichtdurchlässigkeit eines transluzenten Betons. Abbildung 2.8 zeigt das Bruchverhalten eines mit Stahlfasern verstärkten Betons. Nachteil der Zugabe von Fasern sind in der Regel die Verschlechterung der Verarbeitbarkeit und eventuell der Festigkeit.



Abbildung 2.6: Beginnend von oben links: Stahldrahtfaser gewellt, AR-Glasfaserfilamente, Stahldrahtfaser gebündelt, Polypropylenfaser



Abbildung 2.7: Beispiel für Litecon



Abbildung 2.8: Resttragfähigkeit nach Versagen

Stahlfasern werden vor allem als Drähte, als Stahlspäne oder als profilierte Drähte dem Betongemisch zugefügt. Stahlfasern werden auch für massive Betonbauteile in der Praxis verwendet.

Je nach Art der verwendeten Fasern unterscheidet sich der Fasergehalt im Beton. Normalbetone mit Stahl-Langfasern werden zu 0,5 bis 2,5 Vol. % mit Fasern versetzt, Stahl-Kurzfasern werden bis zu 5 Vol. % dem Beton zugefügt. Polypropylenfasern zeigen schon ab einem Anteil von 0,3 Vol. % die gewünschte Wirkung (z.B.: Verhinderung des Abplatzens des Betons im Brandfall).

2.2.5 Zusatzmittel

Betonzusatzmittel sind in Wasser gelöste oder aufgeschlämmte Stoffe, die dem Beton in geringer Menge zugefügt werden, um bestimmte Eigenschaften, darunter

die Verarbeitbarkeit, das Abbindeverhalten, die Festigkeit und/oder die Beständigkeit zu beeinflussen. Im Gegensatz zu Betonzusatzstoffen werden Betonzusatzmittel dem Beton in so einer geringen Menge zugegeben, dass sie prinzipiell nicht als Volumenbestandteile in der Mischrezeptur berücksichtigt werden müssen. In der Normenreihe EN 934 (Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel) sind die Definitionen und Anforderungen der einzelnen Betonzusatzmittel enthalten. Demnach ist ein Zusatzmittel, *„ein Stoff, der während des Mischvorgangs des Betons in einer Menge hinzugefügt wird, die einen Massenanteil von 5 % des Zementanteils im Beton nicht übersteigt, um die Eigenschaften der Betonmischung im frischen und/oder erhärteten Zustand zu verändern“*. Wie die Betonzusatzstoffe dürfen die Zusatzmittel unter keinen Umständen das Erhärten des Zements, die Festigkeit des Betons, die Dauerhaftigkeit des Betons oder den Korrosionsschutz der Bewehrung negativ beeinflussen [13].

Die EN 934-2 unterscheidet folgende Wirkungsgruppen:

- Betonverflüssiger
- Fließmittel
- Stabilisierer
- Luftporenbildner
- Erstarrungsbeschleuniger
- Erhärtungsbeschleuniger
- Verzögerer
- Dichtungsmittel

Betonzusatzmittel werden im Allgemeinen zu 0,2-2 % des Zementgewichts zugefügt. Bei einer Dosierung von mehr als 0,3 Vol. % des Betons, also mehr als 3 l/m³, muss der Wasseranteil im W/B-Wert (Wasser-Bindemittel-Wert) berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden einige Zusatzmittel genauer beschrieben.

Betonverflüssiger und Fließmittel, auch Plastifikatoren oder Superverflüssiger genannt, sind die mit Abstand am häufigsten gebrauchten Betonzusatzmittel [13].

Sie verbessern bei gleichem W/B-Wert die Verarbeitbarkeit des Betons, oder vermindern bei gleichem W/B-Wert den Wasseranspruch des Betons, was sich positiv auf die Druckfestigkeit oder die Dichte des Betons auswirkt. Betonverflüssiger/Fließmittel können sich aber negativ auf das Abbindeverhalten auswirken [9].

Verflüssiger zeigen je nach chemischer Substanz zwei unterschiedliche Wirkungsweisen. Erstens können oberflächenaktive Stoffe die Oberflächenspannung des Abbindewassers heruntersetzen, was eine gewisse Schmierwirkung bewirkt. Parallel dazu können Chemikalien eine Zerstreuung von Zementagglomerationen auslösen, was zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Feinstpartikel im Beton führt. Fließmittel / Betonverflüssiger können aus folgenden chemischen Substanzen bestehen:

- Ligninsulfonate (auch Lignosulfosäure)
- Melamin-Formaldehyd-Sulfonate
- Naphthalin-Formaldehyd-Sulfonate
- Polycarboxylate
- Hydroxycarbonsäuren und deren Salze

Die neueste Generation von Fließmittel basiert auf Polycarboxylatethern. Fließmittel sind besonders für die Herstellung von Pumpbetone oder „selbstverdichtende“ Betonen in Verwendung.

Luftporenbildner bewirken, dass sich Millionen von kleinen Luftporen mit einem Durchmesser von 0,01 bis 0,3 mm bilden. Dadurch haben eingeschlossene Wassertropfen den nötigen Platz sich bei einsetzendem Frost beim Gefrieren auszudehnen, was ein Abplatzen an der Betonoberfläche verhindert. Schon bei geringen Beimengungen von Luftporenbildner kann ein Luftporengehalt von 13% im Zementstein erreicht werden. Diese Art von Zusatzmittel wird hauptsächlich an Betonobjekten verwendet, die Frost und Frosttaumitteln (Streusalz) ausgesetzt sind (Bsp.: Kappen von Straßenbrücken, Stützmauern). Ein unerwünschter Effekt ist die Abnahme der Druckfestigkeit. Faustregel: Jedes Prozent Luftporen bedeutet einen Verlust an Druckfestigkeit von bis zu 3 N/mm^2 . Luftporenbildner bestehen aus oberflächenaktiven Stoffen auf der Basis von Naturprodukten, wie zum Beispiel Wurzelharzseifen oder auch aus Tensiden. Aufgrund der üblicherweise angestrebten hohen Gefügedichte kommen Luftporenbildner in UHPC nur selten vor [13].

Erstarrungs- und Erhärtungsbeschleuniger sind in der Lage den Abbindeprozess des Betons zu beschleunigen. Sie werden vor allem bei spezifischen Betonanwendungen eingesetzt:

- Spritzbeton z.B.: Tunnelbaustellen
- Betonieren in fließendem Gewässer
- Einsetzen von Ankern und Steinschrauben
- Betonieren bei tiefen Temperaturen

Das Ziel ist es mithilfe von Beschleunigern den Beton früher ausschalen, belasten oder dem Frost aussetzen zu können.

Verzögerer bewirken eine Verzögerung beim Abbinden des Zementleims. Dadurch bleibt der Beton länger verarbeitbar. Die Verzögerung wird durch die Behinderung der Wärmeentwicklung mithilfe von Schutzkolloidbildnern oder der Bildung von schwerlöslichen Calciumsalzen hinausgezögert. Eingesetzt wird diese Art von Zusatzmittel bei:

- Betonieren bei heißem Wetter,
- Betonieren großer Kubaturen oder Flächen zur Reduzierung der Wärmeentwicklung,
- Transport von Frischbeton über lange Distanzen [13].

2.2.6 Wasser-Bindemittelwert

Da immer mehr puzzolanische und latent hydraulische Zusatzstoffe in Hochleistungsbetonen eingesetzt werden, wird es notwendig diese Stoffe auch bei der Berechnung des Anmachwasserbedarfs zu berücksichtigen. Daher löst der Wasser-Bindemittelwert immer mehr den früher verwendeten Wasser-Zementwert ab. Der Wasser-Bindemittelwert spiegelt das Verhältnis der Menge des Bindemittels zu der Menge des verwendeten Anmachwassers wieder. Wobei unter Bindemittel, außer dem Zement, auch andere reaktive Stoffe die dem Beton beigemischt werden, gemeint sind. Darunter fallen zum Beispiel Microsilica und Flugasche. Mit folgender Formel ist der W/B-Wert zu berechnen [14].

$$W/B - \text{Wert} = \frac{\text{Wasser}}{\text{Bindemittel}} = \frac{W}{Z + k_f \cdot f + k_s \cdot s} \quad \text{Gl. (2.3)}$$

mit:

W = Menge des Anmachwassers

Z = Menge des Zements

k_f = Korrekturfaktor für Flugasche

f = Menge der Flugasche

k_s = Korrekturfaktor für Silicastaub

s = Menge des Silicastaubs

Prinzipiell kann man sagen, dass sich die erreichbare Festigkeit des Betons umgekehrt proportional zu dem W/B-Wert verhält. Daher versucht man mit Betonverflüssigern oder Fließmitteln den W/B-Wert immer weiter zu senken. Die in dieser Arbeit verwendete UHPC-Betonmischung hat einen W/B-Wert von 0,180; bei Normalbeton liegen die W/B-Werte hingegen zwischen 0,4 und 0,65.

2.3 Chemische Vorgänge beim Erhärten des Betons

In Abschnitt 2.1 ist schon kurz auf die Reaktion zwischen dem Zement und dem Anmachwasser eingegangen worden. In diesem Unterkapitel werden die chemischen Reaktionen und die Zusammenhänge des Betonalters mit den Eigenschaften des Betons genauer erläutert. Den Vorgang des Erhärtens des Zements unter Wasserzugabe nennt man Hydratation. In der Chemie versteht man unter Hydratation die Bildung eines Hydrates aufgrund der Anlagerung von Wasser an eine chemische Bindung. Der Ablauf der Zementhydratation kann man zeitlich in 5 Phasen einteilen. Diese Phasen werden in der Tabelle 2.4 näher beschrieben.

Tabelle 2.4: Einteilung der Hydratation von Portlandzement in 5 Phasen [15]

Stadium	Reaktionskinetik	Chemische Prozesse	Einfluss auf die Betoneigenschaften
1-Anfangshydrolyse	lösungskontrollierte, schnelle Reaktion	Beginn der Hydrolyse, Bildung von Ettringit und Synegit, Inlösunggehen von Ionen	Anstieg des pH-Wertes auf über 12,3
2-Ruhephase	keimbildungskontrolliert, langsame Reaktion	kontinuierliche Lösung von Ionen	bestimmt die Dauer der Verarbeitbarkeit und das erste Ansteifen
3- Beschleunigungsphase	keimbildungskontrolliert, langsame Reaktion	Beginn der Bildung von CSH-Phasen	bestimmt das Ansteifen und die Frühfestigkeitsentwicklung
4-Entschleunigungsphase	lösungs- und diffusionskontrollierte Reaktion	kontinuierliche Bildung von CSH-Phasen und Portlandit	bestimmt die Frühfestigkeit
5-Stetige Phase	diffusionskontrollierte Reaktion	langsame Bildung von Hydratationsprodukten	bestimmt die Endfestigkeit

Bei Betrachtung der Tabelle 2.4 kann man erkennen, dass in der Phase 1 (ab dem Zeitpunkt des Mischens des Betons bis ungefähr 3 Stunden danach) hauptsächlich

Ettringit $\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3] \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$ und andere Sulfat-Phasen entstehen, die das plötzliche Ansteifen der Mischung verhindern, und somit eine ausreichend lange Verarbeitbarkeit des Betons ermöglichen. In der Beschleunigungsphase beginnt die Bildung der Calciumsilikathydrat-Phasen, abgekürzt CSH-Phasen. Dieser Zeitraum ist für die Gefügebildung und die Festigkeitsentwicklung besonders wichtig. Dabei beginnen sich stäbchenförmige Fasern an der Oberfläche der Zementkörner auszubilden und sich langsam untereinander zu verzahnen. Diese so entstandenen Calciumsilikathydrate werden „Typ I-CSH“ genannt. In der fortlaufenden Hydratation entstehen kleine leistenförmige CSH-Phasen, „Typ II-CSH“ genannt. In der Entschleunigungsphase entstehen weitere CSH-Phasen, die eine körnige Struktur besitzen und als „Typ III-CSH“ bezeichnet werden. Bei den letzten gebildeten Calciumsilikathydraten, „Typ IV-CSH“, ist keine spezielle Struktur mehr erkennbar.

Die vier CSH-Typen unterscheiden sich neben dem Erscheinungsbild auch in ihrem Calcium/Silizium-Verhältnis und in ihrer Mikrostruktur. Außer diesen vier genannten CSH-Phasen entstehen auch andere Hydratationsprodukte, wie z.B. Portlandit, also Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und Calciumaluminiumhydrate, die in das CSH-Gefüge integriert werden. Um den Hydratationsprozess besser zu veranschaulichen, stellt man sich am besten ein Zementkorn als Kugel vor, bei dem am Anfang an der Kornoberfläche Ionen gelöst werden und sich dort nach und nach die CSH-Phasen bilden. Es entsteht nun eine Hülle von Hydratationsprodukten um das Zementkorn. Aus dem verhüllten Zementkorn lösen sich weiterhin Ionen, die durch die Hülle durchdiffundieren und so für weitere Hydratationen sorgen [16]. In Abbildung 2.9 ist dieser Ablauf schematisch dargestellt.

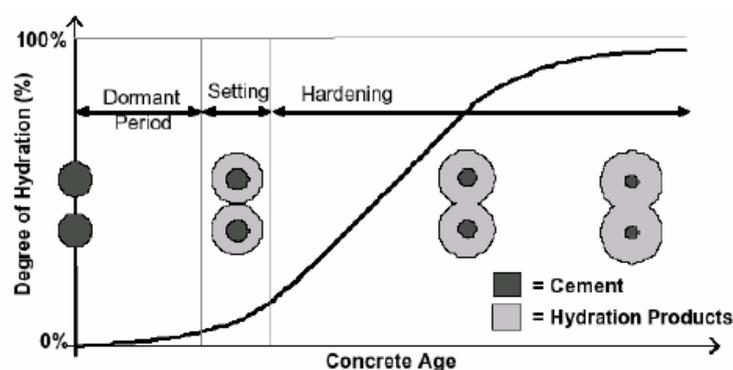


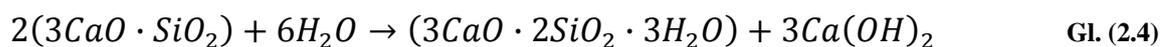
Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Zementhydratation [15]

Außerdem beginnen sich auch im Inneren der Reaktionshülle so genannte „innere Hydratationsprodukte“ zu bilden. In weiterer Folge wird die Schale der Hydratationsprodukte immer dicker, sodass immer weniger Ionen durch die äußere Hülle durchdringen. Dadurch verringert sich die Anzahl der Reaktionspartner und die Hydratationsgeschwindigkeit nimmt immer mehr ab. Grundvoraussetzung jeder Hydratation ist das ausreichende Vorhandensein von Wasser. Es ist beim Lösen und Transportieren von Ionen aus den Zementkörnern unbedingt notwendig und dient in weiter Folge als Reaktionspartner für die Hydratationen. Aus diesem Grund ist es überaus wichtig, dass während der Erhärtung des Betons, genügend Wasser in den Poren verfügbar ist. Vorzeitiges Austrocknen des Betons kann die Bildung weiterer Hydratationsprodukte verhindern und so die Verdichtung des Gefüges negativ beeinflussen.

2.3.1 Hydratationsreaktionen

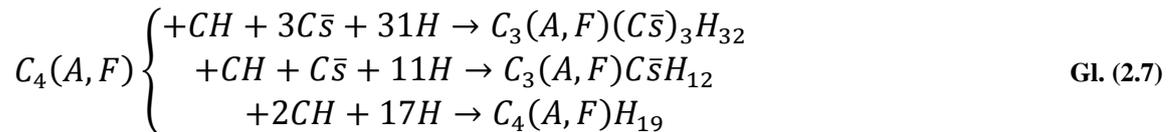
Portlandzement setzt sich zum größten Teil aus den 4 Hauptklinkermineralien Tricalciumsilikat $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (Kurzform C_3S) oder auch Alit genannt, Dicalciumsilikat $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (Kurzform C_2S) oder Belit genannt, Tetracalciumaluminatferrit $4\text{CaO}\cdot(\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (Kurzform $\text{C}_4(\text{A},\text{F})$) und Tricalciumaluminat $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (Kurzform C_3A) zusammen. Außerdem hat Calciumsulfat CaSO_4 einen Anteil von 1-4 Massenprozent des Zements und dient bei der Hydratation als Abbinderegler. Den größten Anteil des Zements macht C_3S mit ca. 40-80% aus, gefolgt von C_2S mit 2-30%. Diese Klinkerphasen sind die Hauptträger der Festigkeitsentwicklung. Wie schon erwähnt werden bei der Reaktion der Calciumsilikate mit Wasser, unterschiedliche Calciumsilikathydrate gebildet, die als CSH-Phasen bezeichnet werden [18].

Für C_3S und C_2S kommen unter anderem hauptsächlich folgende Reaktionen zustande. Die im Folgenden angegebenen Gleichungen sind vereinfacht dargestellt:



In ihrem mineralogischen Aufbau sind diese CSH-Phasen den Schichtsilikaten Tobermorit ($\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_9$) und Jennit ($\text{C}_9\text{S}_8\text{H}_{11}$) sehr ähnlich.

Für $C_4(A,F)$ und C_3A können eine Vielzahl an Reaktionen angegeben werden. Abhängig von dem Angebot an Calciumsulfat sind folgende Varianten möglich: (Folgende Gleichungen sind in vereinfachter Schreibweise angegeben)



Anmerkung: \bar{s} steht für Sulfat

2.3.2 Hydratationsgrad

Als Hydratationsgrad α bezeichnet man den Stand der Hydratation zu einem bestimmten Zeitpunkt. Er ist ein Maß dafür, wie viel von dem vorhandenen Zement schon mit Wasser eine Hydratationsreaktion eingegangen ist. Gewöhnlich wird der Hydratationsgrad über Ersatzgrößen ermittelt, da es sehr aufwendig ist, die Menge an ungebundenen Zement oder der Reaktionsprodukte, an Proben zu erfassen. Im Folgenden sind einige Möglichkeiten der Berechnung des Hydratationsgrads nach [19] aufgelistet.

Berechnung über die Festigkeit:

$$\alpha = \frac{f_t}{f_\infty} \quad \text{Gl. (2.8)}$$

Berechnung über die Wärmefreisetzung:

$$\alpha = \frac{Q_t}{Q_\infty} \quad \text{Gl. (2.9)}$$

Berechnung über die Menge an chemisch gebundenem Wasser:

$$\alpha = \frac{w_{chem,t}}{w_{chem,\infty}} \quad \text{Gl. (2.10)}$$

Es existieren nebenbei auch einige Modelle, mit denen man den Hydratationsgrad bestimmen kann. Da gebräuchlichste ist das Modell von JONASSON [20].

$$\alpha(T(t)) = \alpha(t_e) = e^{\left[-\ln\left(1+\frac{t_e}{t_k}\right)^{-c_1}\right]} \quad \text{Gl. (2.11)}$$

Die Parameter t_k und c_1 sind abhängig von der Zementart, dem Zementgehalt, der Frischbetontemperatur und von der Zugabe von Verzögerern. Die Werte können in den folgenden Diagrammen der Abbildung 2.10 bestimmt werden.

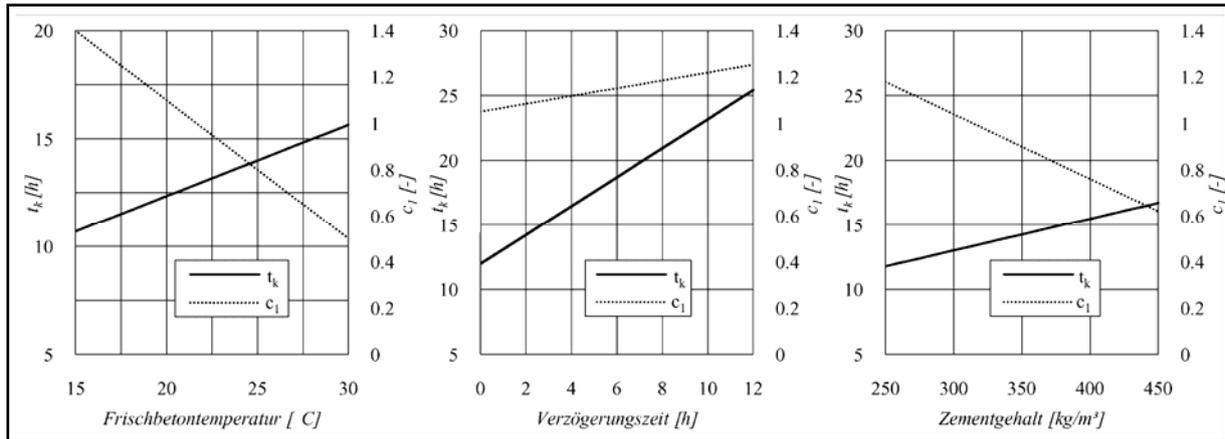


Abbildung 2.10: Diagramme zur Bestimmung der Parameter t_k und c_1 , gelten für Portlandzemente

Der Wert t_e steht für das wirksame Betonalter, das die Abhängigkeit des Hydratationsfortschritts von der Temperatur berücksichtigt. Zur Bestimmung des wirksamen Betonalters wird häufig die Regel von SAUL herangezogen [21].

$$t_e = \frac{\sum \Delta t_i \cdot (T_i + 10)}{30} \quad \text{Gl. (2.12)}$$

Ist die Zusammensetzung des Zements bekannt, kann anhand der Anteile der Bindemittelkomponenten und deren spezifischen Wärmen (siehe Tabelle 2.5) die Gesamtwärmefreisetzung des Zements bestimmt werden.

Tabelle 2.5: Freisetzbare Wärmemenge der Zementanteile [22]

	Qpot [J/g]	Anteile im Portlandzement [Gew.-%]		Anteil im Flugaschezement [Gew.-%]		Anteil im Hochofenzement [Gew.-%]	
		CEM I	CEM II A-V	CEM III A	CEM III B		
Trikalziumsiliat C3S	500	45-80	36-75	16-52	9-27		
Dikalziumsiliat C2S	250	0-32	0-30	0-21	0-11		
Trikalziumaluminat C3A	870	7-15	5,5-14	2,5-10	1,5-5		
Kalziumaluminatferrit C2(A,F)	420	4-14	3-13	1,5-9,1	1-5		
Freies CaO	1150	0,1-3	0,1-14	0-2	0-1		
Freies MgO	840	0,5-4,5	0,5-4	0,2-3	0,1-1,5		
Hüttensand	290	-	-	36-65	66-80		
Flugasche	35	-	6-20	-	-		

2.4 Betoneigenschaften

In diesem Abschnitt soll der Zusammenhang zwischen der verwendeten Betonrezeptur und die daraus resultierenden Betoneigenschaften näher dargelegt werden. Besonders bei UHPC muss auf die Einhaltung der Intensität und Dauer des Mischvorgangs, und auf die Reihenfolge der Zugabe der Inhaltsstoffe penibel geachtet werden, um die gewünschten Eigenschaften des Betons zu erhalten. Schon kleinste Abweichungen (z.B.: Dosierfehler) im Mischprozedere können sehr große Abweichungen in den Betoneigenschaften hervorrufen. Es werden in dieser Abhandlung nur jene Eigenschaften behandelt, die auch an den Probekörpern tatsächlich gemessen wurden.

2.4.1 Rohdichte und Luftgehalt

Die Rohdichte und damit der Luftgehalt im Beton ist direkt abhängig von der erreichten Packungsdichte nach dem Mischen. Aufgrund des sehr niedrigen Wasser-Bindemittelwerts von unter 0,20 und die dichte Feststoffpackung in der Zementmatrix, sinkt der Gesamtluftgehalt im vollständig verdichteten UHPC auf ca. 4-6 Vol-% (ohne Vakuummischtechnik). Die Rohdichte des UHPC beträgt ca. 2300 kg/m³ bis 2500 kg/m³ und ist in etwa um 10% höher als bei Normalbeton [23]. Die hohe Dichtigkeit von ultrahochfesten Beton bewirkt mehrere Vorteile. Zum einen ist der Transport von Gasen und Flüssigkeiten auf ein Minimum behindert und zum anderen sind der hohe Verschleiß-, Frost-, und Frost/Tausalz widerstand zu nennen. Daneben entwickeln ultrahochfeste Betone einen großen Widerstand gegen chemische Angriffe. So konnten bei frei bewitterten UHPC-Proben nach drei Jahren Carbonatisierungstiefen von nur 1,5mm festgestellt werden [24]. In Abbildung 2.11 ist das Schadensbild einer Carbonatisierung von Beton dargestellt.



Abbildung 2.11: Schadensbild einer Carbonatisierung von Beton

Der Nachteil der hohen Dichte liegt im Brandverhalten. Im Brandfall verdampft das freie und Teile des gebundenen Wassers, kann aber nicht durch die Betonoberfläche entweichen. Dadurch werden Dampfdrücke aufgebaut, die die Zugfestigkeit des Betons überschreiten, wodurch es zu explosionsartigen Abplatzungen kommen kann. Ein weiterer Punkt ist die Verringerung der Duktilität im Vergleich zu weniger dichten Beton.

In Ultrahochfesten Betonen sind folgende Arten von Poren aufzufinden:

Gelporen (\varnothing ca. 1nm - 10 nm): Mit der Bildung des Zementgels entstehen automatisch Gelporen. Diese sind unter Normalbedingungen mit Gelwasser, das ist physikalisch gebundenes Anmachwasser, gefüllt. Da immer der gleiche Anteil Wasser in Gelwasser umgewandelt wird, lässt sich ihre Entstehung nicht vermeiden.

Schrumpfporen (\varnothing ca. 10 nm): Entstehen dadurch, dass die Ausgangsstoffe ein höheres Volumen haben als die Reaktionsprodukte. Es folgen Schrumpfprozesse die die unvermeidlichen Schrumpfporen entstehen lassen.

Kapillarporen (\varnothing 10 nm - 100 μ m): Entstehen bei W/Z-Werten von über >0,42. Das bei der Zementhydratation übrig gebliebene Wasser, welches nicht physikalisch in den Gelporen gespeichert ist, hinterlässt nach dem Verdunsten ein zusammenhängendes Geflecht von Kapillarporen im Zementstein. Diese sind verantwortlich für Transportprozesse von Gasen und Flüssigkeiten und haben einen hohen Einfluss auf die Festigkeit und den E-Modul des Betons. Der Kapillarporenanteil liegt bei etwa 1,5 bis 2,0 Vol-%. Je geringer der Wasserbindemittelwert desto geringer der Anteil der Kapillarporen.

Luftporen (\varnothing 1 μ m - 1 mm): Entstehen beim Mischvorgang, wenn Luft in das Zementgel gelangt. Luftporen stellen einen Ausweichraum für gefrierendes Wasser dar und erhöhen somit die Frostbeständigkeit des Betons.

Verdichtungsporen (\varnothing > 1 mm): Verdichtungsporen entstehen durch unzureichende Verdichtung des Betons nach dem Einbau. Aufgrund ihrer Größe haben sie einen hohen Einfluss auf die Festigkeit des Werkstoffs. Diese sollten unter allen Umständen bei Sichtbeton vermieden werden.

Abbildung 2.12 zeigt ein Diagramm mit Porenradiusverteilungen verschiedener Betone.

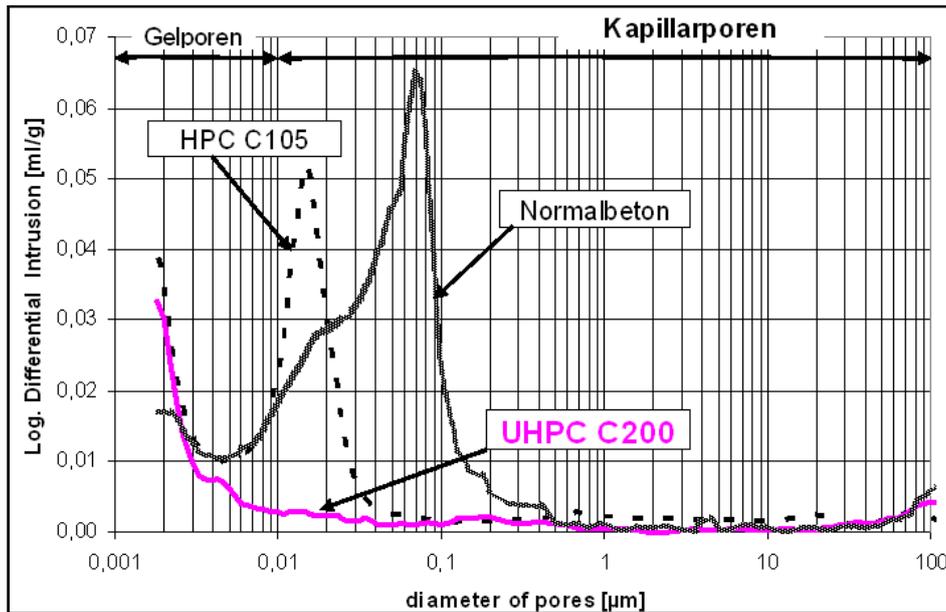


Abbildung 2.12: Vergleich der Porenradienverteilung von Normalbeton C45/55, HPC C105 und UHPC200 [25]

Für eine Optimierung des Korngemisches kann das Modell von *Richard* und *Cheyrezy* [14] angewendet werden. Es gibt Auskunft über den erforderlichen Wasserbindemittelwert mit Hilfe der relativen Dichte (k_{rel}). Die relative Dichte beschreibt das Verhältnis von Festbetonrohddichte (ρ_0) zu der Reindichte des Korngemisches (ρ_s). Wie man in Abbildung 2.13 erkennen kann, liegt der optimale Bereich des Wasserbindemittelwerts zwischen $W/B=0,13$ bis $W/B=0,15$. Diese Werte können bei einer relativen Dichte (k_{rel}) von optimal $k_{rel}=0,87$ erreicht werden (Punkt „C“ und „D“). Ziel ist es, mithilfe verschiedener Mischungen und anschließender Relativedichtebestimmung, bei einem Vergleich der verwendeten W/B -Werte in der Abszisse in den Bereich zwischen „C“ und „D“ zu kommen, um optimale Dichten zu erreichen. Es zeigt sich, dass es möglich ist, die gleichen Relativedichten mit unterschiedlichen W/B -Werten zu erreichen (hier bei Punkt „B“ und bei Punkt „D“), wobei der Bereich zwischen „C“ und „D“ bessere mechanische Betoneigenschaften aufweist.

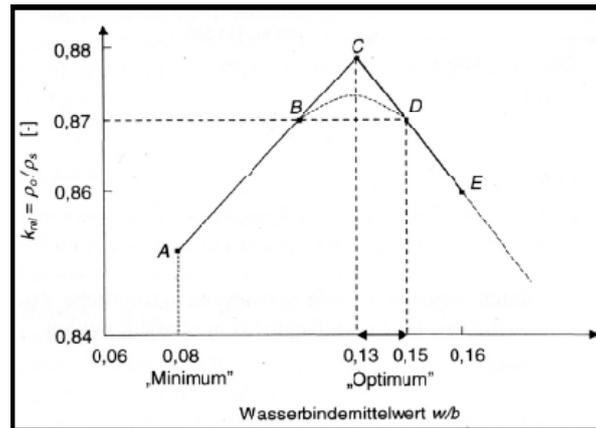


Abbildung 2.13: Modell zur Korndichteoptimierung [14]

2.4.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist eine der wichtigsten Eigenschaften des Betons und wird auch zur Klassifizierung des Betons herangezogen. In der ÖNORM B 4710-1, in Übereinstimmung mit der europäischen Norm EN 206-1 (Bewehrung von Stahlbetontragwerken), wird eine Beurteilung durch eine Druckfestigkeitsprüfung nach 28 Tagen an Würfeln mit 15cm Kantenlänge oder 30cm langen Zylindern mit 15cm Durchmesser vorgeschrieben. Anhand der Prüfergebnisse wird der untersuchte Beton den einzelnen Klassen zugeordnet. Zum Beispiel hat ein Beton C 25/30 eine charakteristische Zylinderdruckfestigkeit ($f_{ck,cyl}$) von 25 N/mm² und eine charakteristische Würfeldruckfestigkeit ($f_{ck,cube}$) von 30 N/mm².

Oberhalb der Festigkeitsklasse von C100/115 spricht man von ultrahochfesten Betonen. Sie fallen somit nicht mehr in den durch europäische oder deutsche Regelwerke abgedeckten Festigkeitsbereich und bedürfen bei einer Anwendung im Bauwesen zum Teil einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung bzw. einer Zustimmung im Einzelfall. Bei optimaler Zusammensetzung und unter Einhaltung der geforderten Qualitätsstandards beim Mischen und im Verlauf der Nachbehandlung, sind auch unter baupraktischen Gegebenheiten Druckfestigkeiten von bis zu 250N/mm² wiederholt zu erreichen. Unter Laborbedingungen ist es auch schon gelungen Beton mit einer Druckfestigkeit von ca. 800N/mm² herzustellen [26]. In Tabelle 2.6 sind die Bezeichnungen der genormten Druckfestigkeitsklassen und deren Anwendungsbereiche eingetragen.

Tabelle 2.6: Druckfestigkeiten von Beton

Festigkeitsklasse nach ÖNORM B4710-1	Festigkeitsklasse nach ÖNORM B4700	Mindestwert der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit in N/mm ²	Mindestwert der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit in N/mm ²	Anwendungsbereiche		
C8/10		8	10			
C12/15	B15	12	15			
C16/20	B20	16	20			Stahlbeton, Spannbeton für massige Bauteile
C20/25	B25	20	25			
C25/30	B30	25	30			
C30/37		30	37			
	B40		40			
C35/45		35	45			
C40/50	B50	40	50			
C45/55		45	55			
C50/60	B60	50	60			
C55/67		55	67			
C60/75		60	75	Hochfester Beton	z.Bs.: Spannbeton	
C70/85		70	85			
C80/95		80	90			

Ein möglicher Nachteil solcher extremen Festigkeitssteigerungen liegt im sehr spröden Bruchverhalten der Bauteile, weil kein erkennbares Fließplateau mehr ausgebildet wird. Somit sind keine deutlichen Anzeichen für ein bevorstehendes Versagen mehr gegeben. Um dem Sprödebruch entgegenzuwirken werden in fast jeder Anwendung von UHPC Fasern beigemischt (Stahlfasern, Kunststofffasern) um dem Beton eine gewisse Duktilität zu verleihen. Unter Anwendung solcher Fasern kann unter Umständen sogar die schlaffe Bewehrung entfallen. Beispielhaft steht hierfür die 140 Meter lange Gärtnerplatzbrücke in Kassel, entwickelt von der Universität Kassel. Sie ist eine Stahl-Beton-Verbundbrücke, wobei die Obergurte und die Deckenplatten aus stahlfaserverstärktem UHPC gefertigt sind, der ohne herkömmliche schlaffe Bewehrung auskommt. Der Untergurt dieser Brücke besteht aus einem filigranen Stahlfachwerk, (siehe Abbildungen 2.14), [27], [28].



Abbildungen 2.14: Gärtnerplatzbrücke in Kassel [28]

Das Bruchverhalten eines faserverstärkte UHPC kann man anhand der Abbildung 2.15 der sehr gut erkennen.



Abbildung 2.15: 4-Punkt-Biegezugversuch mit stahlfaserverstärktem UHPC

Im Folgenden werden einige Methoden aufgezählt, die die Druckfestigkeit von UHPC beeinflussen, beziehungsweise erhöhen können.

Betonrezeptur: Wie bei Normalbeton ändert sich die Festigkeit in Abhängigkeit von der verwendeten Zementklasse, dem Zementgehalt, der Zusammensetzung der Gesteinskörnung, und dem verwendeten Wasserbindemittelwert. Bei UHPC spielen neben diesen Hauptbestandteilen auch die Zusatzmittel, und –Stoffe eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Darauf wird in Abschnitt 3.4 noch genauer eingegangen.

Gefügeoptimierungen haben das Ziel eine möglichst kompakte Kornpackung zu verwirklichen. Es sollen sich die einzelnen Kornfraktionen nicht in ihrer Bewegung beim Mischvorgang behindern.

Verbundoptimierungen sollen die Kontaktflächen zwischen Zementstein und Gesteinsmaterial verbessert werden, um so die Mikrorissbildung weitgehend zu verhindern.

Homogenisierungen des Gefüges werden durch die Reduktion des Größtkorndurchmessers erreicht. Diese Art von Beton nennt man Fein-Kornbeton.

Wasseranspruch: Durch die Verminderung des Wasserbindemittelwerts entstehen weniger Kapillarporen bei der Hydratation.

Vakuumnachbehandlungen sind nicht zu verwechseln mit Vakuummischen von Beton. Eine Vakuumbehandlung entzieht dem Beton Wasser, reduziert damit den Wasserzementwert und verbessert eine Reihe von Betoneigenschaften, wie z.B. Druckfestigkeit, Dichtigkeit. Auch die Schwindverformung verringert sich wegen des geringen Wassergehaltes und die Fugenabstände können vergrößert werden. Der Beton wird zunächst normal eingebracht und verdichtet (Überhöhung von 3 % erforderlich). Je nach Ebenheitsanforderung ist er mit geeignetem Gerät abzuziehen. Erst danach beginnt die Vakuumbehandlung. Die Dauer beträgt in der Regel 1 Minute pro cm Deckendicke. Unmittelbar danach sind die Flächen begehbar, werden mit Glättscheiben oder Glättflügeln nachgearbeitet und anschließend nachbehandelt.

Nachbehandlungen: Wärmebehandlung (Ofen/Mikrowellenofen), Lagerung unter warmen/kalten Wasser, Aufbringung von Druck auf die Proben, u. a. werden in Abschnitt 3.8 näher behandelt.

2.4.3 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit des Betons wird in dieser Arbeit mit zwei unterschiedlichen Methoden ermitteln.

2.4.3.1 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit ist jene Zugspannung die sich bei einem 3-Punkt Biegeversuch (siehe Abschnitt 3.9.2) nach linear-elastischem Materialverhalten am unteren Rand des Probekörpers einstellt. Die Biegezugfestigkeit von Beton ist abhängig von der Festigkeit des Zementsteins, der Gesteinskörnung und dem Verbund zwischen den beiden Komponenten. Normalbetone können Werte zwischen 3 und 8 N/mm² erreichen. In der Praxis wird die Zugfestigkeit von Beton komplett vernachlässigt und die gesamte Zugspannung wird dem Bewehrungsstahl zugeordnet. Ultrahochfeste Betone, die noch dazu mit Fasern verstärkt sind, können Werte zwischen 30 N/mm² und 50 N/mm² erreichen.

2.4.3.2 Spaltzugfestigkeit

Über die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit wird in der Regel ebenfalls die Zugfestigkeit beurteilt. Hierbei werden die Probekörper in 2 gegenüberliegenden Linien bis zum Bruch belastet, und über die Bruchspannung wird die zentrale Zugfestigkeit rückgerechnet.

2.4.4 Konsistenz

Die Konsistenz des Frischbetons unmittelbar nach dem Mischen bezeichnet in der Betontechnik das Maß für die Verarbeitbarkeit des Betons, solange er noch nicht erhärtet ist. Die Konsistenz wird in Ausbreitmaßklassen und Verdichtungsmaßklassen eingeteilt, die durch den Ausbreitversuch, oder den Verdichtungsmaß bei steiferen Konsistenzen, gemessen werden. Die Einteilung reicht von steifen bis sehr fließfähigen Beton. Je nach Konsistenz muss die Verdichtungstechnik gewählt werden. Maßgebend ist die DIN EN 206-1/ DIN 1045-2. Der Beton wird anhand des Ausbreitversuchs (siehe Abschnitt 3.9.4) in sechs Konsistenzklassen eingeteilt, (siehe Tabelle 2.7).

Tabelle 2.7: Tabelle Frischbetonkonsistenz Ausbreitmaß [19]

Klasse	Ausbreitmaß d [cm]	Konsistenzbeschreibung
F1*	≤34	steif
F2	35...41	plastisch
F3	42...48	weich
F4	49...55	sehr weich
F5	56...62	fließfähig
F6	≥63	sehr fließfähig
*bei steifem Beton empfiehlt sich der Verdichtungsversuch		

F1: Steifer Beton: Beton der Konsistenzklasse F 1 stellt die untere Grenze für das Verdichten durch kräftige Rüttler oder durch kräftiges Stampfen bei dünner Schüttlage dar. Für die Bestimmung dieser Konsistenz ist der Verdichtungsversuch besser geeignet als der Ausbreitversuch.

F2: Plastischer Beton: Plastischer Beton ist beim Schütten schollig bis knapp zusammenhängend, sein Feinmörtel ist weich. Er wird durch Rütteln verdichtet.

F3: Weicher Beton: Beton dieser Konsistenz ist beim Schütten schwach fließend. Sein Feinmörtel ist flüssig. Größere Verdichtungsarbeit ist nicht notwendig. Leichtes Rütteln oder Stochern ist zweckmäßig. Hochfester Ortbeton muss F3 oder weicher entsprechen.

F4: Sehr weicher Beton: Die Konsistenz ist so weich, dass die Verdichtung durch Stochern ausreicht. Er muss ein gutes Zusammenhaltevermögen besitzen, um gegebenenfalls ein Verdichten durch leichtes Rütteln ohne schädliches Entmischen zu ermöglichen. Beton der Konsistenzklasse 4 ist mit Fließmitteln herzustellen.

F5: Fließfähiger Beton: Beton dieser Konsistenz ist so fließfähig, dass er allein durch Stochern verdichtet werden kann. Wie der sehr weiche Beton muss auch der Beton Klasse F5 mit Fließmittel hergestellt werden und über ein gutes Zusammenhaltevermögen verfügen.

F6: sehr fließfähiger Beton: Der Beton dieser Konsistenzklasse ist so fließfähig, dass allein die Schwerkraft zum Entlüften und Fließen in dichtester Lagerung bis zum Niveaueausgleich genügt. Die Herstellung erfolgt ebenfalls mit Fließmittel. Weiterhin muss der Beton ein gutes Zusammenhaltevermögen durch einen ausreichend hohen Mehlkorngelhalt aufweisen.

Selbstverdichtender Beton: Bei Ausbreitmaßen über 70 cm handelt es sich um Selbstverdichtenden Beton (SVB), der ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergien allein unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt, entlüftet und die Schalung und die Räume zwischen den Bewehrungsstäben vollständig ausfüllt. Maßgebend ist die Richtlinie "Selbstverdichtender Beton" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton.

Mit dem Verdichtungsversuch gemessen, werden vier Konsistenzklassen unterschieden, (siehe Tabelle 2.8).

Tabelle 2.8: Tabelle Frischbetonkonsistenz Verdichtungsmaß [30]

Klasse	Verdichtungsmaß c	Konsistenzbeschreibung
C0	$\geq 1,46$	sehr steif
C1	1,45...1,26	steif
C2	1,25...1,11	plastisch
C3	1,10...1,04	weich
*bei weichem Beton empfiehlt sich der Ausbreitversuch		

- C0: sehr steifer Beton
- C1: steifer Beton
- C2: plastischer Beton
- C3: weicher Beton (für die Bestimmung dieser Konsistenz ist der Ausbreitversuch besser geeignet als der Verdichtungsversuch.)

3 Versuchsaufbau

3.1 Vorbemerkung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen unterschiedlicher Nachbehandlungen von UHPC anhand einer Gegenüberstellung der Messergebnisse verschiedener Eigenschaften aufzuzeigen.

Es werden alle Versuche jeweils mit vakuumgemischtem UHPC und auch mit normalgemischtem UHPC durchgeführt, um den Einfluss des Vakuummischprozesses aus den Messergebnissen herauslesen zu können. Die gewählte Betonrezeptur wurde [8] entnommen, und lediglich leicht adaptiert.

In der Arbeit kommen sechs verschiedene Nachbehandlungsmethoden zur Anwendung, die in Abschnitt 3.8 genau beschrieben werden.

3.2 Mischen von UHPC :

Im Gegensatz zu den homogenen Werkstoffen, wie zum Beispiel Stahl, in der deren Eigenschaften an jedem Ort des Materials identisch und richtungsunabhängig sind, ist Beton grundsätzlich ein heterogener Baustoff. Das heißt, dass die Eigenschaften des Betons sich im Gefüge von Bezugspunkt zu Bezugspunkt ändern können. Als Ursachen sind die unterschiedlichen Durchmesser von CSH-Phase und den Zuschlagstoffen oder die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten und E-Module im fertigen Beton und der Ausgangskomponenten (Gesteinskörnungen, Zement) zu nennen.

Im Vergleich zu Normalbeton kann man ultrahochfesten Beton aus drei Gründen jedoch schon beinahe zu den homogenen Werkstoffen zählen. Erstens fehlen bei UHPC die groben Zuschläge und werden durch feine maximal 1mm große Gesteinskörnungen ersetzt, wodurch sich annähernd eine geometrische Homogenität ergibt. Zweitens wird die Differenz der E-Module von Zuschlag und Zementstein verringert, und drittens ist der Wärmeausdehnungskoeffizient von quarzhaltigen Zuschlägen und vom Zementstein bei geringem Wasser-Bindemittel-Wert nahezu identisch.

Um diese wünschenswerte Homogenität zu erreichen ist dem Mischprozess besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Allgemein kann man die Funktionsweise des Mischprozesses folgendermaßen beschreiben: Der Elektromotor des Mixers wandelt die zugeführte elektrische

Energie in mechanische Arbeit um. Die dadurch freigesetzte Bewegungsarbeit der Mischwerkzeuge bewirkt zum einen eine Beschleunigungsarbeit (Arbeit zur Überwindung der Trägheit des Mischgutes) und zum anderen eine Hubarbeit (Arbeit zum Anheben des Mischgutes). In der Folge führt dies zu Relativbewegungen innerhalb des Mischgutes, welche die Durchmischung der Betonbestandteile, bzw. den eigentlichen Mischvorgang darstellen.

Die Mischungen wurden mit einem Intensivmischer der *Fa. Eirich* mit angeschlossener Vakuumpumpe der *Fa. Sterling* hergestellt, (siehe Abbildung 3.1).

Dieser Mischer besitzt ein Fassungsvermögen von maximal 5 Litern oder maximal 8kg.



Abbildung 3.1: Intensivmischer R 02/VC, Bj 2008 der Firma Eirich mit angeschlossener Kompakt-Vakuumanlage PL 26 M.A.M 15 0.0 A der Firma Sterling

3.2.1 Das Eirich-Mischprinzip

In einem herkömmlichen Mischgerät werden ausschließlich die Mischwerkzeuge bewegt und kratzen das Mischgut über Boden- und Wandflächen des Mischbehälters. Das bewirkt, dass ein Teil der Bewegungsenergie in Reibung und Verschleiß umgewandelt wird und so für den restlichen Mischvorgang nicht mehr genutzt werden kann. Ein Eirich-Mischer arbeitet nach folgendem Prinzip. Die Mischwerkzeuge fahren schnell (es können Werkzeuggeschwindigkeiten zwischen 1m/s und 40m/s eingestellt werden) durch das bewegte Mischgut, und der sich

drehende Mischbehälter transportiert das Mischgut zu den Mischwerkzeugen. Bei der Wahl der Werkzeuggeschwindigkeiten muss darauf geachtet werden, dass keine Kornzertrümmerungen bei größeren Zuschlägen auftreten. Die Materialbewegungen sind ausgelöst durch Wurfkräfte, Fliehkräfte und freien Fall. Es tritt aber keine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Mischbehälterwand oder -Boden und Mischgut auf. Lediglich am Boden-Wandabstreifer können Wand- und Bodenreibungen entstehen. Dort beträgt die Geschwindigkeit des Mischgutes konstant 1m/s, unabhängig von der Drehzahl der Wirblerwerkzeuge. Dadurch bleibt der Bewegungsenergieverlust auf konstanter Höhe und es ist somit möglich, die Wirblerwerkzeuge beliebig schnell laufen zu lassen ohne die Reibung im Wand- oder Bodenbereich zu erhöhen [31].

Das spezielle Eirich-Mischsystem besteht aus drei Komponenten, die besonders flexibel an die Anforderungen der Mischprozesse angepasst werden können. Der sich drehende Mischbehälter soll das Mischgut in den Bereich der Mischwerkzeuge fördern. Ein oder mehrere exzentrisch angeordnete Mischwerkzeuge (Stiften- oder Sternwirbler) (siehe Abbildung 3.2) erzeugen je nach Anwendung einen Gegenstrom oder einen Querstrom mit optimaler Geschwindigkeitsdifferenz. Der statische Abstreifer, der für eine kontinuierliche Vertikalkomponente des Mischgutstromes sorgt, soll Anbackungen an der Behälterwand und dem –Boden verhindern und das Entleeren am Ende der Mischzeit beschleunigen [32].



Abbildung 3.2: v.l.n.r: Stiftenwirbler, Sternwirbler

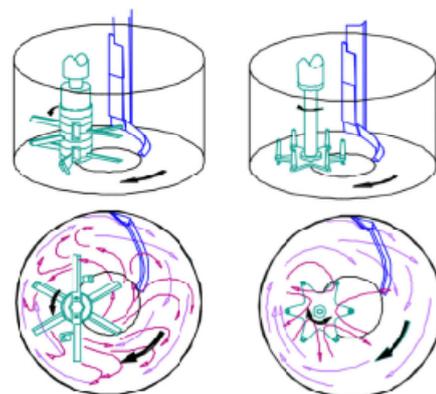


Abbildung 3.3: Wirblergeometrie Stern- und Stiftenwirbler

Diese Mischtechnologie ist für das Mischen einfacher Betone nicht notwendig, sondern wird hauptsächlich zu Herstellung von „Spezialbetonen“ verwendet. Vorteile

ergeben sich bei Betonen mit höheren Feinkornanteilen und Betonen mit feinen bzw. reaktiven Zusatzstoffen, wie Microsilica oder Farbpigmenten, die 50 bis 100 mal feiner sind als die Zementteilchen. Das liegt daran, dass Eirich-Mischer intensiver mischen, Agglomerate aufschließen und Additive homogen in der Mischung verteilen. Der Mischprozess und die gewählten Maschinenparameter (Drehzahl, Gleich- oder Gleichstrommischen) sind in Anlehnung an [8], in leicht modifizierter Form festgelegt. Die Versuchsmischungen wurden alle mit einem Stiftenwirbler bei Querstrommischen hergestellt. Das Querstromprinzip bedeutet, dass sich die Mischwerkzeuge und der Mischbehälter in dieselbe Richtung drehen.

3.2.2 Leistungseintrag des Mixers

Die geleistete Mischarbeit in einem Mischprozess kann über die Beziehung zwischen Konsistenz des Mischgutes und dem Leistungseintrag des Elektromotors ermittelt werden. Grundsätzlich muss man, um eine bestimmte Mischaufgabe zu erreichen, eine bestimmte Menge an Arbeit leisten. Die spezifische Mischleistung ergibt sich aus der effektiven Motorbelastung und dem Gewicht der Mischung. Sie wird in der Dimension $[\text{kW}/100\text{kg}]$ festgehalten. Die Mischarbeit (gemessen in $[\text{kWh}]$) ist abhängig von der spezifischen Mischleistung und der Mischdauer.

Die dem Mischgut zugeführte Energie ist abhängig von der Konsistenz der Mischung. Bei rein mechanischen Mischaufgaben, das bedeutet das Mischgut ist chemisch nicht reaktionär, sinkt der spezifische Energieverbrauch bei Mixern mit einem hohen Leistungseintrag. Das heißt, dass trockenes Mischgut (zum Beispiel reines Vermischen des Zements mit der Gesteinskörnung) wesentlich weniger Energie aufnimmt, als die mit dem Anmachwasser versetzte Mischung, (siehe Abbildung 3.4, [32]).

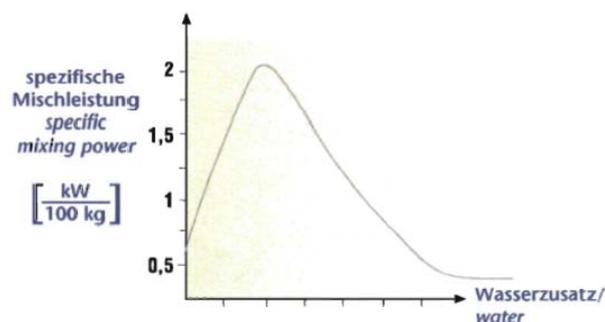


Abbildung 3.4: Der spezifische Leistungsbedarf in Abhängigkeit vom Wassereintrag [32]

In Abbildung 3.5 erkennt man, wie die eingebrachte Mischleistung mit der Mischdauer zusammenhängt. Man sieht, dass sich nach einer gewissen Mischzeit die Leistung asymptotisch einem bestimmten Wert annähert.

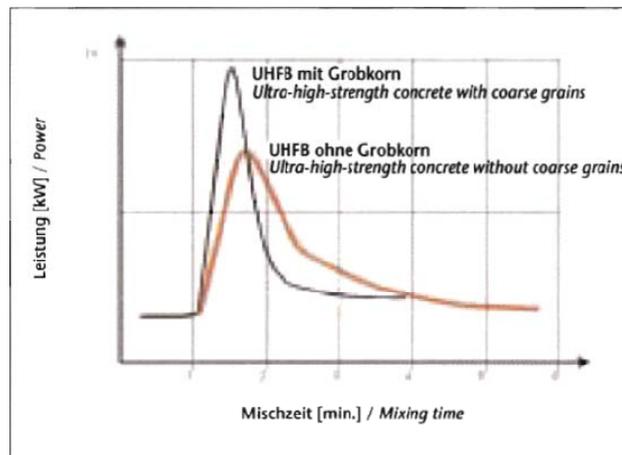


Abbildung 3.5: Die Mischleistung in Abhängigkeit von der Mischzeit [32]

3.3 Vakuummischen

3.3.1 Begriffserklärung Vakuum

Ein Vakuum (von lat. *vacuus* „leer“) bezeichnet einen vollkommen leeren Raum. In der Physik wird das Wort Vakuum auch so definiert: Ein Vakuum bezeichnet den Zustand eines Fluids in einem Volumen bei einem Druck, der deutlich niedriger ist als der Atmosphärendruck bei Normalbedingungen.

In der heutigen verfügbaren Technik ist die Herstellung eines vollkommen materiefreien Raumes nicht möglich. So werden die künstlich hergestellten Vakua nach der Menge der verbleibenden Materie eingeteilt. Gemessen werden die Vakua in Pascal (Pa) oder Millibar (mbar), (siehe Tabelle 3.1, [33]).

Tabelle 3.1: Einteilung der Vakua nach dem herrschendem Unterdruck [33]

Einordnung anhand der Druckbereiche			
Druckbereich	Druck in kPa (mbar)	Moleküle pro cm ³	mittlere freie Weglänge
Umgebungsdruck	1013,25	$2,7 \times 10^{19}$	68 nm
Großvakuum	300...1	$10^{19} \dots 10^{16}$	0,01...100 µm
Feinvakuum	$1 \dots 10^{-3}$	$10^{16} \dots 10^{13}$	0,1...100 mm
Hochvakuum (HV)	$10^{-3} \dots 10^{-7}$	$10^{13} \dots 10^9$	100 mm...1 km
Ultrahochvakuum (UHV)	$10^{-7} \dots 10^{-12}$	$10^9 \dots 10^4$	1...10 ⁵ km
extrem hohes Vakuum (XHV)	$<10^{-12}$	$<10^4$	$>10^5$ km

Vorkommen und Beispiele nach Vakuumqualität:

- Grobvakuum: Staubsauger ($>0,5$ bar), Vakuumverpackung, Gasentladungslampen, Glühlampen, Dampfturbinenkondensator ($\sim 0,03$ bar)
- Feinvakuum: Niederdruck-Gasentladungslampen
- Hochvakuum: Elektronenröhren, Teilchenbeschleuniger
- Ultrahochvakuum: Teilchenbeschleuniger, erdnahe Weltraum, häufig in Anlagen der Halbleiterherstellung
- XHV: Weltraum, (selten) in Anlagen der Halbleiterherstellung

Wie bei Atmosphärendruck können sich Licht, Teilchen, Festkörper, elektrische, magnetische und Gravitationsfelder im Vakuum, also im luftleeren Raum, ausbreiten. Schallwellen hingegen brauchen ein materielles Medium, im Normalfall sind dies die Luft, oder feste Körper (Bauteile). Sie können sich daher im Vakuum nicht ausbreiten. Wärmestrahlung kann sich als elektromagnetische Welle auch im Vakuum fortpflanzen. Dagegen führt die Absenkung des Drucks zur Verminderung der materiegebundenen Wärmeübertragung (Konduktion und Konvektion). Die Verringerung von Wärmeströmung (Konvektion) und Wärmeleitung (Konduktion) findet Anwendung in Thermoskannen, Dewar-Gefäßen und zur Wärmeisolation von Tanks für Flüssiggas (Sauerstoff, Argon, Stickstoff, Helium).

3.3.2 Herstellung von Vakua

Im Allgemeinen stellt man mithilfe eines abgeschlossenen Behälter (zum Beispiel aus Glas oder Stahl), genannt der Rezipient, der mithilfe von einer geeigneten Vakuumpumpe vom darin enthaltenen Gas befreit wird, ein Vakuum her. Damit gewährleistet wird, dass das Vakuum stabil bleibt, muss der Rezipient, also der Vakuumbehälter, komplett abgedichtet sein, um einen Gas- oder Flüssigkeitsaustausch mit der Umgebung zu verhindern. Lösbare Verbindungen, zum Beispiel die Verbindung des Vakuumbehälters mit der Vakuumpumpe, werden meistens mittels Elastomer- oder Metaldichtungen hergestellt. Das Dichtmaterial kann, je nach Qualität des hergestellten Vakuums, aus verschiedensten Werkstoffen bestehen. Die am häufigsten eingesetzten sind Viton, Kupfer- und Golddrahtdichtungen, aber auch Teflon und Indium.

Mithilfe von Vakuumpumpen ist es möglich Vakua künstlich zu erzeugen. Vakuumpumpen können anhand ihrer Technik und nach der Qualität des von ihnen

erzeugten Vakuums eingeteilt werden. Technisch gesehen arbeiten Vakuumpumpen wie Verdichter [33].

Man unterscheidet, je nach physikalischer Wirkungsweise Gastransfer-
vakuumpumpen und gasbindende Vakuumpumpen. Typische Vertreter der
Gastransferpumpen sind beispielsweise Verdrängerpumpen, Membranpumpen,
Hubkolbenvakuumpumpen, Drehschieberpumpen, Sperrschiebervakuumpumpen,
Wälzkolbenvakuumpumpen, Schraubenvakuumpumpen, Molekularpumpen, Turbomolekular-
pumpen oder auch Flüssigkeitsstrahlpumpe. Gasbindende Vakuumpumpen erzielen
ihre Pumpwirkung, indem sie Teilchen an Festkörperoberflächen binden (dieser
Vorgang wird allgemein als Sorption bezeichnet) und folglich den Druck im
Rezipienten vermindern. Zu den gasbindenden Vakuumpumpen gehören unter
anderem Getterpumpen, Kryopumpen oder auch Adsorptionspumpen.

Im Folgenden wird auf die Verdrängerpumpen genauer eingegangen. Allen
Verdrängermaschinen gemeinsam ist ein gekapselter (abgeschlossener)
Arbeitsraum, dessen Größe sich während des Arbeitsspiels zyklisch ändert.
Verdrängervakuumpumpen arbeiten in vier Arbeitsspielphasen: Ansaugen,
Transportieren (Verdichten), Ausschieben und Druckwechsel. Die Ansaug- und
Ausschiebephase werden dabei auch als niederdruckseitiger (ND-) und
hochdruckseitiger (HD-) Ladungswechsel bezeichnet. Bei Verdrängerpumpen tritt
das im Vakuumbehälter enthaltene Gas in den durch Kolben, Rotoren oder Schieber
gebildeten Arbeitsraum ein, der Arbeitsraum wird abgeschlossen, das Gas wird
verdichtet und dann ausgestoßen. Die mechanischen Elemente innerhalb
nasslaufender Pumpen sind gegeneinander durch eine Flüssigkeit, meist Öl,
abgedichtet. Bei einer Flüssigkeitsringpumpe kommt auch Wasser als Dichtmedium
zum Einsatz. In den letzten Jahren ist allerdings ein Trend zu trockenlaufenden
Maschinenbauarten ("Trockenläufern") zu verzeichnen, bei denen im Bereich des
Arbeitsraums auf Hilfsfluide verzichtet wird. Hiermit wird eine Verunreinigung des
Arbeitsmediums vermieden. Zudem entsteht ein geringerer Wartungsaufwand, und
die Kosten für die Entsorgung der Hilfsflüssigkeiten entfallen.

3.3.3 Vakuumkompaktanlage der Fa. Sterling

Im Verlauf dieser Arbeit sind alle vakuumgemischten Betonproben mit einer
Vakuumkompaktanlage Typ *PL 26 M.A.M 15 0.0 A* der Fa. Sterling, wie sie in der

Abbildung 3.7 dargestellt wird, hergestellt worden [34]. Abbildung 3.6 zeigt die wichtigsten Bestandteile der verwendeten Vakuumpumpe.

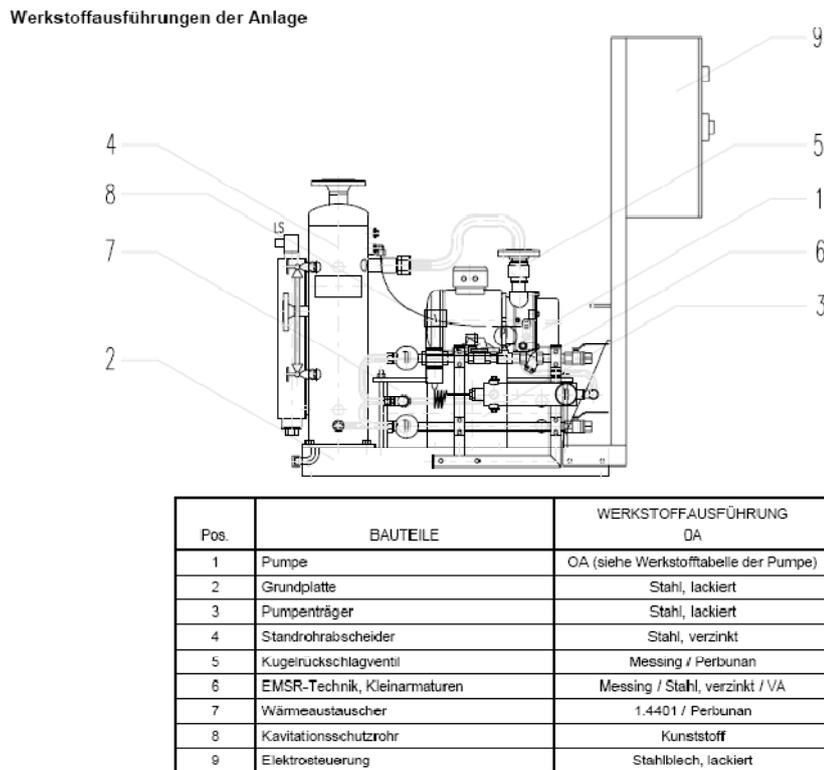


Abbildung 3.6: Bestandteile einer Flüssigkeitsringpumpe Typ *PL 26 M.A.M 15 0.0 A* der Fa. Sterling [34]



Abbildung 3.7: Foto einer Flüssigkeitsringpumpe Typ *PL 26 M.A.M 15 0.0 A* der Fa. Sterling [34]

Diese Pumpe wird zum Fördern und Absaugen von trockenen oder feuchten Gasen verwendet, wobei auch Flüssigkeiten mitgefördert werden können. Der Anwendungsbereich dieser Pumpen liegt in der Erzeugung von Druck zwischen 33mbar und 900mbar. In dem kreisrunden, zylinderförmigen Gehäuse der Flüssigkeitsringpumpe ist ein sternförmiges, exzentrisch der Zylinderachse

angeordnetes Flügelrad eingebaut. Durch die bei der Rotation des Flügelrades entstehende Zentrifugalkraft, bildet die im Gehäuse befindliche Flüssigkeit einen gleichmäßigen Flüssigkeitsring. Dieser dichtet die Laufradkammern ab und verhindert eine Funkenbildung durch aneinander reibende Metallteile. Durch die exzentrische Rotation des Flügelrades tauchen die Flügel unterschiedlich tief in die Flüssigkeit ab und bilden somit unterschiedlich große Kammern, in denen sich das zu fördernde Medium befindet. Somit entsteht beim Eintauchen der Flügelräder ein Überdruck (das Gas wird komprimiert), und beim Auftauchen entsteht ein Unterdruck (das Gas wird ausgedehnt). In den Deckeln die das Flügelrad seitlich abdichten sind Aussparungen, der Druckschlitz auf der eintauchenden Seite und der Saugschlitz auf der austauchenden Seite. Dieses Funktionsprinzip ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

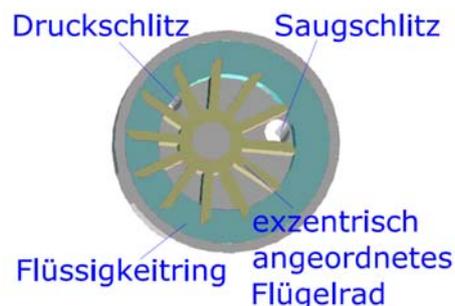


Abbildung 3.8: Prinzip der Flüssigkeitsringpumpe [35]

Während des Betriebes muss die Pumpe laufend mit Betriebsflüssigkeit versorgt werden, um die bei der Gasverdichtung entstehende Wärme abzuführen und den Flüssigkeitsring auffüllen zu können, da ständig mit dem Gas auch ein Teil der Flüssigkeit die Pumpe verlässt. In einem Standrohrabscheider wird die Flüssigkeit von dem Gas getrennt.

Bei den Versuchen im Rahmen dieser Arbeit, wurde Wasser in Trinkwasserqualität als Betriebsflüssigkeit verwendet. Beim Betonanmischen unter Vakuum muss man besonders auf die Temperatur des Mischgutes achten, da Wasser bei verschiedenen Umgebungsdrücken, unterschiedliche Siedetemperaturen besitzt, (siehe Abbildung 3.9).

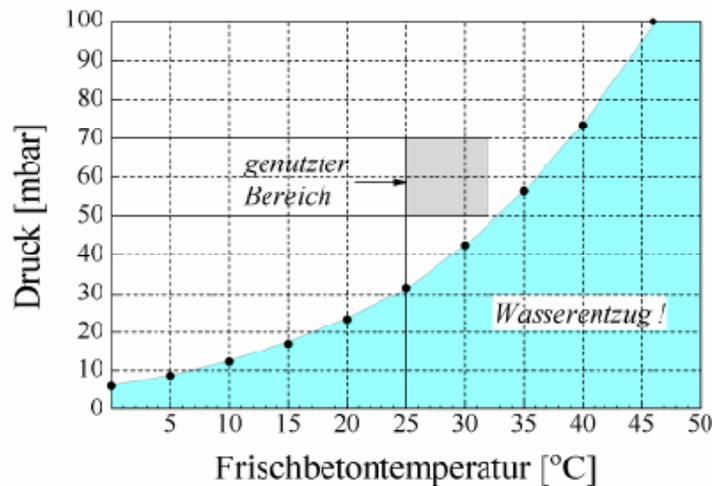


Abbildung 3.9: Zusammenhang zwischen Unterdruck und Temperatur [36]

3.4 Zusammensetzung der UHPC-Mischung

3.4.1 Zement

Es wird ein Zement CEM I 42,5 R WT 38 C₃A-frei / HS C₃A-frei der Fa. LaFarge verwendet. Diese Zementart verbindet die chemische Widerstandsfähigkeit von C₃A-freien Zementen, insbesondere gegen Sulfatangriff, mit dem Erhärungsverhalten eines frühhochfesten Portlandzementes. Trotz des raschen Erhärungsverlaufes zeichnet sich der CEM I 42,5 R WT 38 C₃A-frei/HS C₃A-frei durch geringe Wärmeentwicklung, gute Verarbeitbarkeit, geringen Wasserbedarf und gute Nacherhärtung aus. Seine Anwendung geht von Fertigteile- bzw. Rohrherstellung zu Tunnel-Innenschalen WDI und Hochleistungsbeton. Die Tabelle 3.2 zeigt eine Auswahl an Eigenschaften des CEM I 42,5 R WT 38 C₃A-frei / HS C₃A-frei.

Tabelle 3.2: Eigenschaften des CEM I 42,5 R WT 38 C₃A-frei/HS C₃A-frei. [37]

Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung	Richtwerte	Normanforderungen	
		ON EN 197-1	ON B 3327-1/2
Dichte in kg/dm ³	3,15	-	-
Druckfestigkeit (bei 20°C) in N/mm ²			
1 Tag	20	-	>=11
2 Tag	33	>20	-
7 Tag		-	-
8 Tag	59	>=42,5 >=62,5	-
Biegezugfestigkeit (bei 20°C) 28 Tage in N/mm ²	-	-	-
Malfeinheit(Blainewert) in cm ² /g	4200	-	<=5% Schwankungen
Erstarrungsbeginn (bei 20°C) in Minuten	170	>=60	>=90
Bluten in cm ³ nach 120min	3,2	-	<=20
Temperaturanstieg ΔT in K	32	-	<=38
Sulfatbeständigkeit bzw. C ₃ A-frei	ja	-	C ₃ A-frei

In der nachfolgenden Tabelle 3.3 sind die chemischen Bestandteile des Zements nach ihren Massenprozenten aufgegliedert.

Tabelle 3.3: Chemische Zusammensetzung des CEM I 42,5 R WT 38 C₃A-frei/HS C₃A-frei. [11]

Chemische Verbindungen	Massenanteile in %
SiO ₂	21,50%
Al ₂ O ₃	3,40%
Fe ₂ O ₃	7,10%
CaO	65,80%
MgO	1,30%
SO ₃	0,21%
K ₂ O	0,31%
Na ₂ O	0,10%
<hr/>	
Tricalciumsilikat C ₃ S	64,00%
Dicalciumsilikat C ₂ S	13,40%
Tricalciumaluminat C ₃ A	0,00%
Dicalciumferrit C ₂ F	2,50%
Calciumaluminatferrit C ₄ AF	16,30%
Freikalk CaO	1,30%

3.4.2 Gesteinskörnung

Es werden Quarzmehl 16900 und Quarzsand 0/1 der Fa. *Quarzit-Sandwerke Feichtinger GesmbH* und Quarzsand 0,06/1 der Fa. *Kies Union* als Gesteinskörnung für die gewählte Betonrezeptur verwendet. Der Quarz der Fa. Feichtinger wird in Haßbach abgebaut und zählt zu den so genannten Semmering-quarziten. In Haßbach tritt dieses kristalline Gestein in einem hohen Reinheitsgrad sehr nahe an der Oberfläche auf.

3.4.2.1 Chemische Analyse Quarzes, (siehe Tabelle 3.4)

Tabelle 3.4: Inhaltsstoffe Feichtinger Sand [38]

Inhaltsstoffe	Anteil [%]
SiO ₂	90-97%
Fe ₂ O ₃	0,3-0,6%
Al ₂ O ₃	2,0-3,5%
CaO	0,1-0,2%
MgO	0,15%

Schädliche Anteile, wie Humusstoffe, Tonmineralien, Nitrate oder Chloride kommen überhaupt nicht oder nur in zu vernachlässigenden Spuren vor.

3.4.2.2 Physikalische Eigenschaften des Quarzes, (siehe Tabelle 3.5)

Tabelle 3.5: ausgewählte physikalische Eigenschaften des Feichtinger Sand [38]

Physikalische Eigenschaften	
Härte nach Mohs:	7
Einaxiale Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]	300
Los-Angeles-Wert (Splitt gebr. 5-8):	19,7
Frostbeständigkeit (Splitt gebr. 5-8, nach dreimaligem Frost-Tau-Wechsel) [Absplitterung in %]	<0,05
Ungleichförmigkeit nach Casagrande	2,3
Kornform: Länge/Dicke	<3:1

3.4.2.3 Sieblinienanalysen der verwendeten Gesteinskörnungen

Abbildung 3.10 und Tabelle 3.6 zeigen die Sieblinienanalyse und die Sieblinie der in dieser Arbeit verwendeten Gesteinskörnungen.

Tabelle 3.6: Sieblinienanalyse Quarzsand 0,06/1, Quarzsand 0/1, Quarzmehl 16900

Quarzsand 0,06/1													
Siebmaschenweite[mm]	0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Rückstand[%]						2,35	3,73	15,18	63,49	14,42	0,83	0,00	0,00
Siebdurchgang[%]						0,00	2,35	6,08	21,26	84,75	99,17	100,00	100,00
Quarzsand 0/1													
Siebmaschenweite[mm]	0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Rückstand[%]						23,40	16,63	15,38	21,17	23,20	0,22	0,00	0,00
Siebdurchgang[%]						0,00	23,40	40,03	55,41	76,58	99,78	100,00	100,00
Quarzmehl 16900													
Siebmaschenweite[mm]	0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Rückstand[%]	10,00	20,00	14,00	26,00	27,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Siebdurchgang[%]	0,00	10,00	30,00	44,00	70,00	97,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

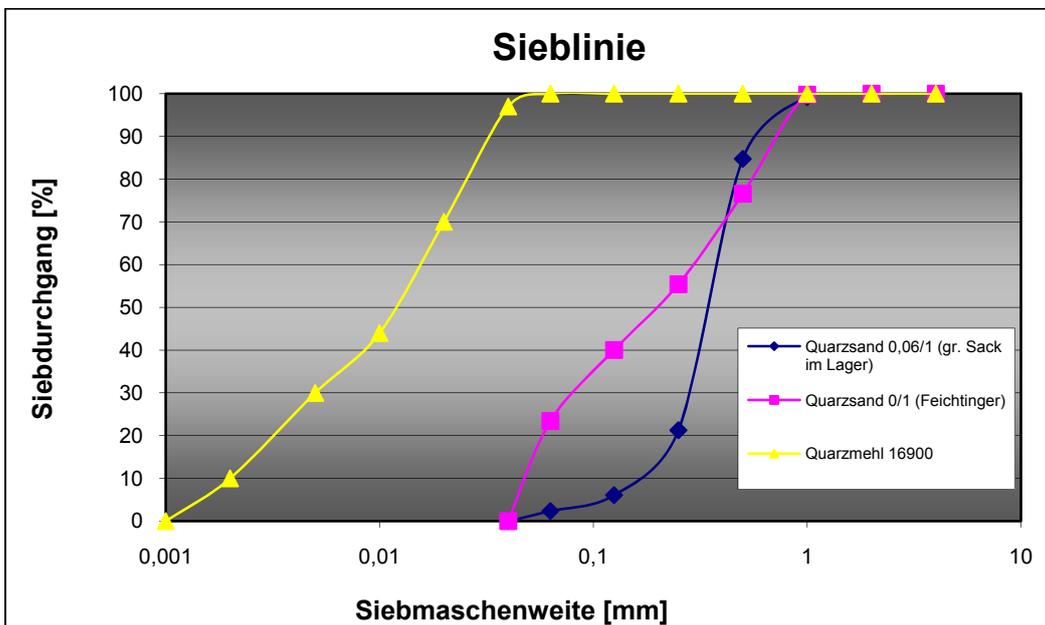


Abbildung 3.10: Sieblinie Quarzsand 0,06/1, Quarzsand 0/1, Quarzmehl 16900

3.4.3 Betonzusatzstoffe

Als Betonzusatzstoff wird nur Microsilica Grade 940-U der Fa. Elkem beigemischt. Hier einige ausgewählte Eigenschaften des gewählten Silica-Staubs:

Partikelgröße: Die meisten Staubkörner sind unter einem Mikrometer groß. Der durchschnittliche Durchmesser der Staubkörner beträgt ca. 1 μm (Zum Vergleich: Der in dieser Arbeit verwendete Zement CEM I 42,5 R hat in etwa einen mittleren Durchmesser von 16 μm . In Abbildung 3.11 ist die Korngrößenverteilung von Microsilica, Zement CEM I 42,5 R HS und anderen Materialien dargestellt.

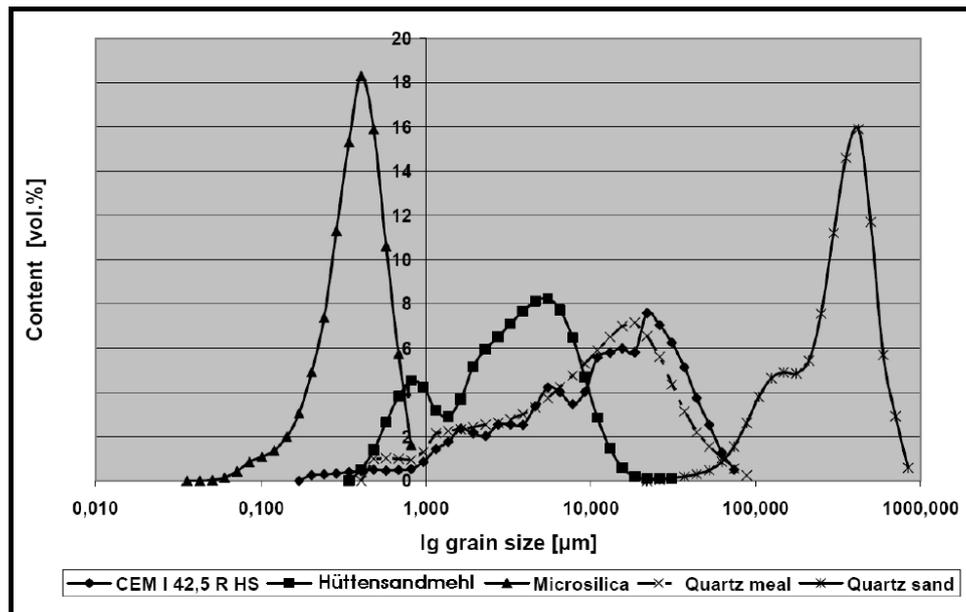


Abbildung 3.11: Vergleich der Korngrößenverteilung verschiedener Materialien [26]

Partikelform: Die Microsilica besitzen eine gläserne, glatte Oberfläche und kommen hauptsächlich in Kugelform vor, wie man in Abbildung 3.12 gut erkennen kann.

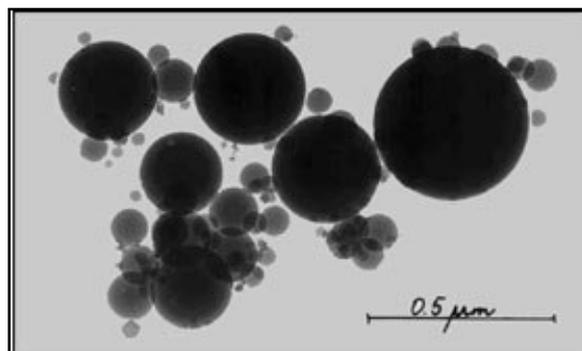


Abbildung 3.12: Bild von Microsilicapartikel, aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop[39]

Die spezifische Oberfläche beträgt zwischen 15.000 und 30.000 m^2/kg (ermittelt mit der Stickstoff-Absorptionsmethode, engl. nitrogen-absorption method – BET). Die Rohdichte von Microsilica beträgt ungefähr 2300 kg/m^3 und die Schüttdichte beläuft sich in der gelieferten Form auf ca. 500-700 kg/m^3 [39].

3.4.4 Betonzusatzmittel

Um die Verarbeitbarkeit zu steigern, bzw. um den W/B-Wert möglichst gering zu halten, wird dem Beton das Fließmittel DURIMENT SF Advanced High der Fa. Betontechnik beigemischt.

DURIMENT SF Advanced High ist ein universell einsetzbares Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylsäure zur Wassereinsparung und/oder zur Konsistenzhöhung. Die Dichte des Fließmittels beträgt zwischen 1040 – 1080 kg/m³ und der pH-Wert liegt zwischen 5,5 - 7,5 [40].

3.5 Die prinzipielle Mischreihenfolge

Der Ultrahochleistungsbeton in dieser Arbeit wurde in 8 aufeinander folgenden Mischphasen hergestellt.

Phase 1: Es werden die Feinteile, also der Zement, die Microsilica und das Quarzmehl, in den Mischer geleert und für 1-2 Minuten homogenisiert.

Phase 2: In dieser Phase werden die Zuschlagstoffe, also die Quarzsande, innerhalb ca. 30 Sekunden zugefügt.

Phase 3: Die Feinteile und die Zuschlagstoffe werden weitere 1,5 bis 2 Minuten stetig durchmischt.

Phase 4: Das Anmachwasser und die halbe Dosis Fließmittel werden langsam und gleichmäßig innerhalb von 30 Sekunden hinzugefügt. Die eine Hälfte des Fließmittels wird zur Vermeidung von Agglomerationen des Microsilicastaubs schon mit dem Anmachwasser hinzugefügt.

Phase 5: Hier werden für ca. 120 Sekunden das Anmachwasser und die trockenen Bestandteile durchmischt.

Phase 6: Der Rest des Fließmittels wird langsam und gleichmäßig hineingegossen.

Phase 7: 6 Minuten wird stetig, mit gleichbleibender Mischgeschwindigkeit, nachgemischt.

Phase 8: In der letzten Mischphase (3 Minuten) wird im geschlossenen Mischsystem beim vakuumgemischtem Beton ein Unterdruck von 50 bis 70 mbar angelegt und der Frischbeton entlüftet. Diese Phase entfällt bei den normalgemischtem Betonen.

3.6 Frischbetonprüfungen

Unmittelbar nach dem Mischen des Betons werden folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt.

3.6.1 Ermittlung des Luftgehalts

Die Ermittlung des Luftgehalts des Frischbetons wurde in Anlehnung an die ÖNORM B3303 durchgeführt. Die Messung erfolgte mit dem Druckausgleichverfahren. Hierbei wird der Frischbeton in einen vorher befeuchteten Behälter, in den so genannten Luftporentopf, mit genau einem Liter Volumen, gegossen und dann vollkommen plan abgestrichen. Wie bei der Probenherstellung wird auch der Beton im Luftporentopf etwa 30 Sekunden auf dem Rütteltisch verdichtet. Anschließend wird der Luftporentopf mit dem dazugehörigem Verschlussaggregat druckdicht verschlossen. Beim Verschließen des Topfes ist darauf zu achten, dass der Rand des Behälters sauber und leicht feucht ist, damit die Druckdichtheit gewährleistet ist. Über die zwei geöffneten Ventile (siehe Abbildung 3.13, die roten Hähne) wird solange Wasser in den Luftporentopf gegossen, bis es auf der gegenüberliegenden Seite wieder austritt, um den verbleibenden Hohlraum auszufüllen.



Abbildung 3.13: Luftporentopf zu Bestimmung des Luftgehalts des Frischbetons

Die beiden Ventile werden geschlossen und mit der Pumpstange am Kopf des Luftporentopfes wird solange Luft eingepumpt bis der Zeiger des Manometers bis unter die 0-Markierung zeigt. Mittels des Schwarzen Knopfs (siehe Abbildung 3.13, oben rechts), dem Feinregulierungsventil, wird nun solange Luft abgelassen, bis der

Zeiger genau bei der roten Eichmarkierung stehen bleibt. Jetzt kann man bei Betätigung der grünen Taste (siehe Abbildung 3.13, oben links) den prozentuellen Luftgehalt messen.

3.6.2 Ermittlung der Rohdichte

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgt unmittelbar vor dem Messen des Luftporengehalts. Und zwar eruiert man das Gewicht des mit dem Frischbeton gefüllten Luftporentopfes, um sich anschließend die Rohdichte errechnen zu können.

Da das Volumen des Topfes genau 1L entspricht, ergibt sich folgende Formel:

$$\rho_r = \frac{m_1 - m_2}{V_{\text{Topf}}} \quad \text{Gl. (3.1)}$$

mit:

ρ_r = Rohdichte des Frischbetons [kg/m³]

m_1 = Masse des Vollen Luftporentopfes [kg]

m_2 = Masse des leeren Luftporentopfes [kg]

V_{Topf} = Volumen des Topfes [m³]

3.6.3 Ermittlung des Ausbreitmaßes

Wie schon in Abschnitt 1.3.4 erläutert, wird mittels des Ausbreitmaßes auf die Konsistenz des Betons geschlossen. Normalerweise wird als Prüfnorm die ÖNORM B 3303 hinzugezogen, aber aufgrund der zu geringen Mischkubatur für diese Prüfung, erfolgte die Ermittlung des Ausbreitmaßes in Anlehnung an die EN 459-2.

Es wird zuerst die waagrechte Platte des Ausbreittisches mit einem feuchten Tuch abgewischt und der Setztrichter mittig darauf platziert. Anschließend wird der Trichter mit dem Frischbeton bis zum Rand gefüllt und der überstehende Beton wird abgestrichen, sodass sich eine plane Oberfläche ergibt. Um eine gleichmäßige Füllung des Trichters zu gewährleisten wird mit 10 leichten Stößen des Ausbreittisches der Frischbeton verdichtet.

Nach 10-15 Sekunden wird nun der Trichter senkrecht vom Tisch gehoben und man beginnt mit 15 Stößen den Frischbeton auszubreiten. Mit einem Messschieber wird nun der Durchmesser des ausgebreiteten Frischbetons in zwei zu einander orthogonalen Richtungen gemessen und dann der Mittelwert dazwischen berechnet [41]. Abbildung 3.14 zeigt den während der Versuche dieser Arbeit verwendeten Ausbreittisch.



Abbildung 3.14: Ausbreittisch zur Ermittlung des Ausbreitmaßes

3.7 Schalung der Probekörper

Unmittelbar nach der Durchführung der Frischbetonprüfungen wurde der Frischbeton in Schalungsformen aus Stahl gegossen, um Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm herzustellen, in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1, (siehe Abbildung 3.15). Vor dem Einbringen des Betons sind die Schalungen mit einem Öl zu bestreichen, dass nachher das Ausschalen erleichtern soll. Anschließend wurde der eingebrachte Beton noch ca. 20 Sekunden auf dem Rütteltisch verdichtet. Die mit Beton gefüllten Formen wurden nun 24 Stunden an der Raumluft gelagert, wobei, um das Austrocknen der Probekörper an der Oberfläche zu verhindern, PE-Folie darüber ausgebreitet wurde.



Abbildung 3.15: Schalungsform nach ÖNORM EN196-1

3.8 Nachbehandlungen

Der Erhärtungsprozess bei UHPC wird im Großen und Ganzen von den folgenden Werten beeinflusst:

- W/B-Wert
- Verwendete Gesteinskörnungen/Sieblinie
- Chemische Zusammensetzung und Art des Zements
- Hydratationsgrad des Zements
- Verwendete Art und Menge der Zusatzstoffe und –Mittel
- Umgebungstemperatur
- Art des Mischens des Betons (z.B. Vakuummischen)
- Art der Nachbehandlung

Um aus der verwendeten Mischrezeptur die bestmöglichen Festigkeitsergebnisse zu erzielen, kann man den Beton einer Druckbeaufschlagung oder einer thermischen Behandlung während des Erhärtens unterziehen.

Eine Druckbehandlung, also das Aufbringen einer Druckkraft auf den Frischbeton, dient dazu einen möglichst dichten Beton herzustellen. Dabei wird überschüssiges Abbindewasser aus dem Frischbeton herausgepresst.

Bei der thermischen Behandlung muss man zwischen feuchter und trockener Wärmebehandlung unterscheiden. Die Wärmebehandlungen erfolgen grundsätzlich durch einfaches Erwärmen des Betons mit trockener Luft, feuchter Luft, Wasserdampf, oder unter Wasser. In der einschlägigen Literatur findet man Nachbehandlungen angefangen bei 50-70°C bis maximal 400°C. Je nachdem wie hoch die Temperatur während der Nachbehandlungen ist, laufen im Inneren des Betons andere chemische oder physikalische Reaktionen ab. Ab ca. 90°C und darüber wird die puzzolanische Reaktion des als Zusatzstoff in UHPC verwendeten Silica-Staub beschleunigt. Darüber hinaus entstehen bei so einer Wärmebehandlung längere CSH-Phasen, was auf einen höheren Hydrationsfortschritt zurückgeführt werden kann. Im Allgemeinen wird die Mikrostruktur, der bei diesen Temperaturen entstehenden Hydratphasen, modifiziert. Bei Temperaturen bis 150°C entsteht beispielsweise das besonders feste und dichte Tobermorit $\text{Ca}_5[\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})]_2 \cdot 2-5\text{H}_2\text{O}$. Dieses Mineral besitzt ein orthorhombisches-disphenoidales Kristallsystem, wie in Abbildung 3.16 abgebildet, und wird in der Härteskala nach Mohs als 2,5 eingestuft, [42].

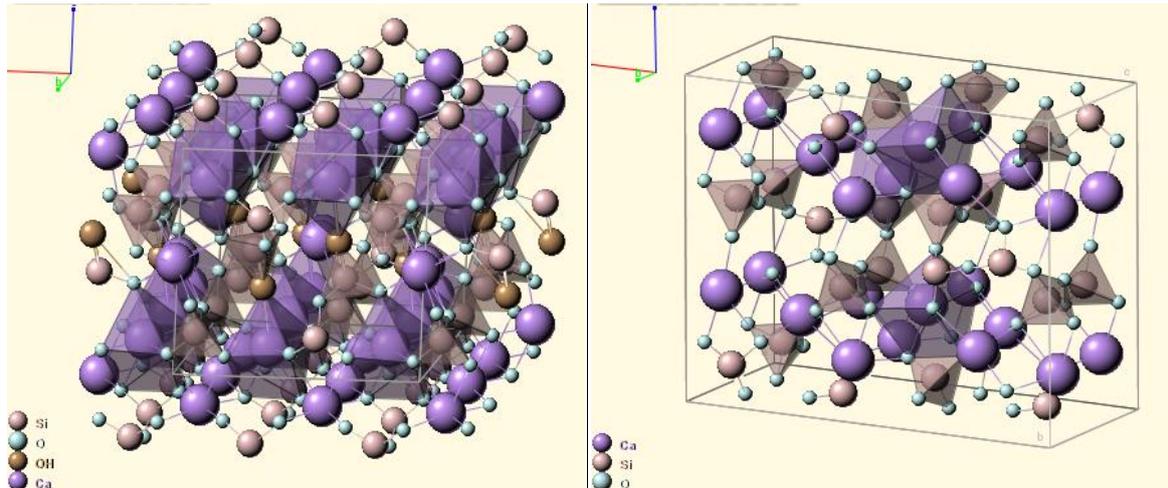


Abbildung 3.16: v.l.n.r.: Kristallstruktur Tobermorit[42], Kristallstruktur Xonotlit [43]



Abbildung 3.17: v.l.n.r.: Foto Tobermorit, Foto Xonotlit

Während einer Wärmebehandlung bei 200°C bis 400°C entstehen ebenfalls kristalline Hydrate, Xonotlite genannt mit der chemischen Formel $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$, die die Festigkeit des erhärteten Betons ebenfalls erhöhen können (siehe Abbildung 3.17). Dieses Mineral besitzt eine monokline-prismatische Kristallstruktur und hat ein meist nadelförmiges Erscheinungsbild. Auf der Härteskala von Mohs erreicht Xonotlit einen Wert von 6,5 [43]. Begleitet von der Xonotlitbildung tritt eine Dehydratisierung der CSH-Phasen der erhärtenden Zementmatrix auf. Dies geschieht aufgrund der starken Erhitzung in den abgeschlossenen Poren, die dafür sorgt, dass die hygrothermalen Bedingungen zur Bildung solcher kristalliner Phasen, wie eben Xonotlit, vorhanden sind. Das heißt, durch die hohe Temperaturbeaufschlagung werden die röntgenamorphen Hydratationsprodukte zumindest teilweise in den kristallinen Zustand überführt. Untersuchungen von *Cheyrezy et al.* haben gezeigt, dass nach Wärmebehandlungen im Bereich zw. 200°C und 400°C die kristallinen

Xonotlite nur im Inneren der Probekörper gefunden werden konnten. Daraus kann man schließen, dass die für ihre Bildung benötigten hygrothermalen Bedingungen nur im Inneren der Probekörper vorhanden sind. Bei der Transformation von röntgenamorphen CSH-Phasen zu den kristallinen Xonotliten wird chemisch gebundenes Wasser freigesetzt und kann aufgrund der extrem niedrigen Porosität des ultrahochfesten Betons nicht entweichen. Deshalb muss man UHPC, der einer Wärmebehandlung von über 200°C ausgesetzt war, eine erhöhte Aufmerksamkeit im Hinblick auf das Abplatzverhalten bei einer Brandbeanspruchung über 400°C widmen.

Bei allen thermischen Nachbehandlungen ist außerdem darauf zu achten, die Proben nicht durch eine zu schnelle Aufheiz- bzw. Abkühlgeschwindigkeit zu schädigen, da eventuell unerwünschte Mikrorisse entstehen können, die den Vorteil der verbesserten Mikrostruktur wieder aufheben. Als Richtwert dienen aus der Literatur Werte um die 0,2K/min.

In dieser Arbeit kommen insgesamt sechs verschiedene Nachbehandlungsmethoden zur Anwendung. Alle ausgewählten Nachbehandlungsmethoden sind erprobte Methoden, die der Literatur entnommen, jedoch leicht adaptiert worden sind.

3.8.1 Nachbehandlung in Anlehnung an die ÖNORM EN B 3303

Die Probekörper werden nach 24h ausgeschalt und in 20°C warmes Wasser gelegt. Am 8. Tag werden die Proben aus dem Wasser genommen und bis zum 28.Tag an der Raumluft gelagert.

3.8.2 Nachbehandlung an der Raumluft

Die Probekörper werden nach 24h ausgeschalt und ohne Unterbrechung, abgedeckt durch PE-Folie um unerwünschtes Austrocknen zu verhindern, bis zum 28.Tag bei Raumluft gelagert. Eigentlich entspricht das einer Nachbehandlung durch Versiegelung.

3.8.3 Warmwasserlagerung

Die UHPC-Prüfkörper werden nach 24h ausgeschalt und danach für weitere 24h abgedeckt an der Raumluft gelagert. Danach werden die Proben einem Wasserbecken mit 90°C Wassertemperatur ausgesetzt, wobei diese 48h, also vom 2.

bis zum 4.Tag, inklusive 6h Anfahr- und 6h Herunterfahrzeit, dort verweilen. Danach folgt bis zum 28 Tag eine Standardbehandlung, d.h. Lagerung an der Raumluft [44].



Abbildung 3.18: Warmwasserbecken für die Heißwasserlagerung

Die Warmwasserlagerung wird mit einem institutseigenen Becken mit eingebauten Heizstäben und integriertem Temperaturregler durchgeführt, (siehe Abbildung 3.18).

3.8.4 Ofenwarmbehandlung 1, 90°C

Die UHPC-Prüfkörper werden nach 24h ausgeschalt und dann bis zum 3. Tag, mit PE-Folie abgedeckt, an der Raumluft gelagert. Anschließend werden die Probekörper vom 4. bis zum 7.Tag in einen Heißluftofen mit 90°C Lufttemperatur gelegt. Hierbei soll der Ofen mit einer Hitzerate von 10K/h aufgeheizt bzw. abgekühlt werden. Danach erfolgt bis zum 28.Tag wieder eine Lagerung an der Raumluft [45].

3.8.5 Ofenwarmbehandlung 2, 250°C

Die UHPC-Prüfkörper werden nach 24h ausgeschalt und dann bis zum 3. Tag mit PE-Folie abgedeckt an der Raumluft gelagert. Anschließend werden die Probekörper vom 4. bis zum 12.Tag in einen Heißluftofen mit 250°C Lufttemperatur gelegt. Hierbei soll der Ofen mit einer Hitzerate von 10K/h aufgeheizt bzw. abgekühlt werden. Danach erfolgt bis zum 28.Tag wieder eine Lagerung an der Raumluft [45].

3.8.6 Warmwasser- plus Ofenwarmbehandlung

Die UHPC-Prüfkörper werden nach dem Ausschalen vom 1. bis zum 8. Tag in Wasser mit 20°C, und anschließend vom 8. bis 10. Tag, in Heißwasser mit 90°C gelegt. Danach werden die Prüfkörper vom 10. bis 11. Tag bei 200°C Heißluft (Heizrate von 30K/h) gelagert und anschließend vom 12. bis zum 28. Tag wieder in 20°C warmes Wasser gelegt [46].

3.8.7 Darstellung aller Nachbehandlungen

Zur besseren Veranschaulichung sind alle Nachbehandlungsmethoden untereinander in Tabelle 3.7 eingetragen.

Tabelle 3.7: Darstellung aller Nachbehandlungen

Darstellung der Lagerungsbedingungen der Proben aller angewandten Nachbehandlungsmethoden																												
Tag nach dem Ausschalen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Nachbehandlung 1: In Anlehnung an die ÖNorm B 3303	Wasserbad ~20°C							Raumlufte ~20°C																				
Nachbehandlung 2: Lagerung an Raumlufte (~20°C)	Raumlufte ~20°C																											
Nachbehandlung 3: Warmwasserbehandlung (90°C)	RL	Wasserbad 90°C	Raumlufte ~20°C																									
Nachbehandlung 4: Ofenwarmbehandlung 1 (90°C)	RL		Ofen 90°C	Raumlufte ~20°C																								
Nachbehandlung 5: Ofenwarmbehandlung 2 (250°C)	RL		Ofen 250°C					Raumlufte ~20°C																				
Nachbehandlung 6: Warmwasser- plus Ofenwarmbehandlung	Wasserbad ~20°C							Wasserbad 90°C	Ofen 200°C	Wasserbad ~20°C																		

3.9 Festbetonprüfungen

Es werden jeweils für jede Nachbehandlungsmethode an deren 1., 15., und 28.Tag nach dem Ausschalen mechanische Bruchversuche durchgeführt. Außerdem wird jede Prüfserie an jedem Tag an dem sich deren Lagerung im Zuge der Nachbehandlung ändert auf ihre Festigkeiten geprüft. Dabei werden jeweils 3 Probekörper (Mörtelprismen) aus jeder Probenserie (jede Serie wird anders nachbehandelt) einem Biegezugversuch einem Spaltzugversuch und einem Druckversuch unterzogen. Die Bestimmung der Porosität wird an den 28 Tage alten Proben mittels Quecksilber-Porosimetrie bestimmt. Anschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst, gegenübergestellt und im Hinblick auf den Einfluss des Vakuummischprozesses ausgewertet.

3.9.1 Festbetonrohddichte

Bevor die Probekörper den mechanischen Bruchversuchen unterzogen wurden, sind diese mit einer Schiebelehre auf Hundertstel mm abgemessen und gewogen worden. Mit der folgenden Formel konnte man nun die Festbetondichte jedes einzelnen Probekörpers ausrechnen.

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad \text{Gl. (3.2)}$$

ρ = Rohddichte

M = Masse

V = Volumen

3.9.2 Biegezugversuch

Für die Biegezugversuche wird die institutseigene Standprüfmaschine der Fa. *Zwick*, Typ 250Z, verwendet. Ausgewählte Eigenschaften der Prüfmaschine können der Tabelle 3.8 entnommen werden.

Tabelle 3.8: Prüfmaschineneigenschaften [47]

Eigenschaften der Standprüfmaschine, Zwick Z250	
Max. Prüfkraft [kN]	250
Prüfraumhöhe [mm]	1715
Prüfraumbreite[mm]	
-normal	630
-verbreitert	1030
Prüfraumtiefe [mm]	∞
Max. Traversen- geschwindigkeit [mm/min]	600
Traversenwegauflösung [µm]	0,0082

Die Prüfmaschine ist mit hartverchromten Führungssäulen und einem Präzisionskugelumtrieb mit spielfrei eingestellten Spindelmuttern ausgestattet. Die Maschine ist mit einem PC verbunden, mit dem man über eine spezielle Prüfsoftware die Prüfungen einrichten, starten und steuern kann.



Abbildung 3.19: Prüfmaschine Zwick Z250

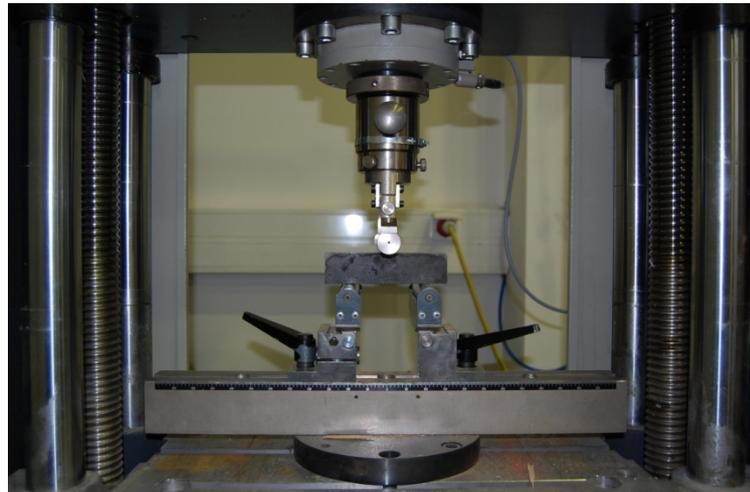


Abbildung 3.20: 3-Punkt-Druck-Prüfung

Die Prüfungen werden in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 durchgeführt. Wie schon in Abschnitt 2.4.3 erwähnt, wird die Biegezugfestigkeit mit einem 3-Punkt-Druck-Verfahren, wie sie auch in Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 gezeigt wird, ermittelt. Hierbei werden die Probekörper auf zwei stählerne Zylinder, die Stützrollen, gelegt, wobei die Längsachse der Prismen normal auf die Achse der Zylinder stehen soll. Der Abstand der Zylinderachsen zueinander beträgt 100mm. Der dritte Zylinder bringt mittig auf den Probekörper mit einer Laststeigerungsrate von 50 +/- 10 N/s

eine Kraft auf, bis zum Bruch der Proben. Mit der ermittelten Bruchlast kann man unter Benützung folgender Formel die Biegezugfestigkeit rückrechnen.

$$\beta_{BZ} = \frac{1,5 \cdot F_{BZ} \cdot l}{b^3} \quad \text{Gl. (3.3)}$$

mit:

β_{BZ} = Biegezugfestigkeit [N/mm²]

F_{BZ} = Bruchlast [N]

l = Auflagerbreite [mm]

b = Seitenlänge Prisma [mm]

3.9.3 Spaltzugfestigkeit

Für die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit wurde die Prüfmaschine *TONI Technik Modell 2040* verwendet. Die Probekörper für die Spaltzugfestigkeitsversuche sind eine der beiden Bruchstücke der Probekörper aus den Biegezugfestigkeitsversuchen. Die Spaltzugfestigkeitsversuche werden in Anlehnung an die *ÖNORM EN 12390-6* [48] durchgeführt. Es werden aber statt zylinderförmige, prismenförmige Proben verwendet. Die Probekörper werden so in dem Prüfgerät eingespannt, dass diese jeweils auf den gegenüberliegenden Seiten mit einer linienförmigen Druckkraft mit einer Laststeigerungsrate von 50 +/- 10 N/s belastet werden. Zwischen Probekörper und Prüflastplatten wurde pro Seite jeweils ein Hartfaserstreifen von 1cm Breite dazwischen gelegt, um die linienförmigen Belastungsflächen zu gewährleisten. Die sich ergebende orthogonale Zugkraft verursacht den Bruch des Probekörpers unter Zugspannung. Die Probe wird anschließend bis zum Bruch belastet und aus der nun ablesbaren Höchstlast kann man, wie folgt, die Spaltzugfestigkeit berechnen.

$$\beta_{SZ} = \frac{3 \cdot F_{SZ}}{\pi \cdot l \cdot h} \quad \text{Gl. (3.4)}$$

mit:

β_{SZ} = Spaltzugfestigkeit [N/mm²]

F_{SZ} = Bruchlast [N]

l = Länge der Kontaktlinie des Probekörpers [mm]

h = Höhe des Prismas [mm]

3.9.4 Druckfestigkeit

Das andere Bruchstück aus den Biegezugversuchen wird für die Ermittlung der Druckfestigkeit herangezogen. Für diesen Versuch wird ebenfalls die Prüfmaschine der Fa. *TONI Technik Modell 2040* (siehe Abbildung 3.21). mit einer maximalen Prüflast von 300kN verwendet. Diese computergesteuerte Prüfeinrichtung ist auch mit einer Software der Fa. *TONI Technik* ausgestattet, wobei die Messdaten wie Belastungszunahme und Dehnungsweg direkt mittels Kraftmessdose und Wegabnehmer an einen gekoppelten PC übertragen werden.



Abbildung 3.21 Prüfmaschine *TONI Technik Modell 2040*, Bj. 1997

Die Prüfungen werden in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 [49] durchgeführt. Zwischen den Prüfplatten (oben und unten) und den Prismen werden 5mm dicke Hilfsplatten aus Stahl mit den Abmessungen 40x62,5 mm dazwischen gelegt, um jeweils immer die genau gleiche Belastungsfläche bei jedem Versuch zu gewährleisten. Die Prismenhälften sind so auf die Prüfplatte der Prüfmaschine zu legen, dass sie seitlich innerhalb +/- 0,5 mm ausgerichtet sind. In Längsrichtung so, dass die Endflächen der Prismen ungefähr 10 mm über die Platte bzw. die Hilfsplatte hinausragen.

Die Prüfkörper sind mit einer Laststeigerungsrate von 2400 +/-200 N/s zu belasten bis keine weitere Last mehr aufgenommen werden kann. Danach kann aus der Bruchlast die Druckfestigkeit mit folgender Formel ausgerechnet werden [49].

$$\beta_D = \frac{F_D}{A_0} \quad \text{Gl. (3.5)}$$

mit:

β_D = Druckfestigkeit [N/mm²]

F_D = Bruchlast [N]

A_0 = Belastungsfläche 40x62,5 [mm]

3.9.5 Quecksilber- porosimetrie:

Die Quecksilber- Porosimetrie wurde ursprünglich von *Ritter* und *Drake* entwickelt und ist die am weitesten verbreitete Methode zur Bestimmung der Porenweitenverteilung von Festkörpern im Bereich von Makro- und Mesoporen. Mit dieser Technik kann man zuverlässig Aussagen über die Porengrößenverteilung, das Porenvolumen, die Scheinbare und Wahre Dichte der meisten porösen Materialien, unabhängig von deren Art und Form ermitteln.

Die Technik beruht auf dem Eindringen der nicht benetzenden Flüssigkeit Quecksilber in ein poröses System bei angelegtem Druck. Der dabei benötigte Druck ist abhängig von der Porengröße und dem Benetzungswinkel. Als Benetzungswinkel wird der Winkel bezeichnet, den ein Flüssigkeitstropfen auf der Oberfläche eines Feststoffs zu dieser Oberfläche bildet (siehe Abbildung 3.22). Die Größe des Kontaktwinkels zwischen Flüssigkeit und Feststoff hängt ab von der Wechselwirkung zwischen den Stoffen an der Berührungsfläche. Je geringer diese Wechselwirkung ist, desto größer wird der Kontaktwinkel.

Bei allen nachfolgenden Berechnungsformeln werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Oberflächenspannung des Quecksilbers und sein Benetzungswinkel gegenüber dem Feststoff sind während der Analyse konstant.
- Das System ist im Gleichgewicht.
- Es werden zylinderförmige Poren angenommen.
- Die Feststoffe werden durch den Druck nicht deformiert.

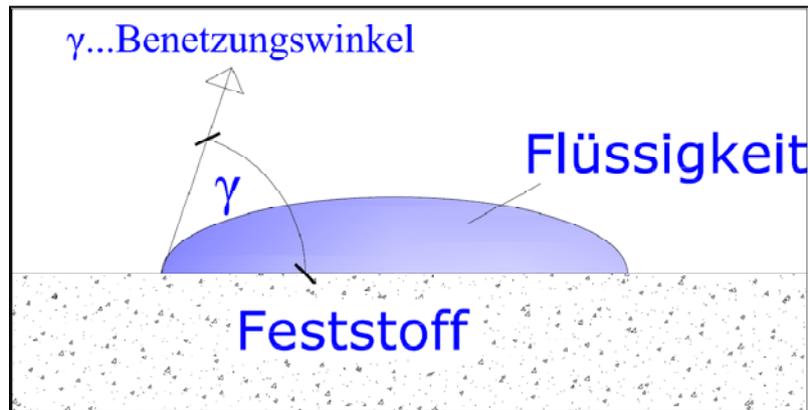


Abbildung 3.22: Definition Benetzungswinkel

Mit Hilfe der Washburn-Gleichung kann aus dem Druck die entsprechende Porenweite berechnet werden.

$$r = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{(P_{hg} - P_l)} \quad \text{Gl. (3.6)}$$

mit:

P_{hg} = Druck des Quecksilbers

P_l = Druck der Luft

r = Porenradius

γ = Oberflächenspannung des Quecksilbers

θ = Benetzungswinkel

Für eine Quecksilber-Pososimetrie sollten die Proben ca. 1 bis 1,5 g schwer sein und eine etwas länglich Form besitzen, damit diese ohne Probleme im Dilatometer Platz finden. Damit der zu untersuchende Porenraum für das Quecksilber zugänglich ist, muss das Porenwasser durch Trocknen vollständig aus den Poren entfernt werden. Mittels der Quecksilber-Pososimetrie lassen sich folgende Eigenschaften des untersuchten Materials bestimmen.

3.9.5.1 Porenvolumen

Aufgrund der Tatsache, dass Quecksilber eine nicht benetzende Flüssigkeit ist, dringt es bei der Befüllung des Dilatometers nicht in die Poren der Probe ein. Erst unter Druck kann das Quecksilber in die Poren hineingetrieben werden. Durch die sich verkürzende Quecksilbersäule im Dilatometer kann man das Volumen des in die Poren eingedrungenen Quecksilbers messen. Dieses Volumen dient nun als

unmittelbares Maß des Porenvolumens des Probekörpers. Das Porenvolumen der Probe wird in [mm³/g] angeführt [50].

3.9.5.2 Spezifische Porenoberfläche

Die spezifische Oberfläche lässt sich auf der Basis des Porenmodells der Zylinderporen ermitteln. Nach folgender Gleichung ergibt sich die Mantelfläche für jede Porenklasse für Zylinderporen.

$$A_i = \frac{2 \cdot V_i}{r_i} \quad \text{Gl. (3.7)}$$

mit:

A_i = Die spezifische Porenoberfläche einer Porenklasse

V_i = Porenvolumen einer Porenklasse

r_i = mittlerer Porenradius einer Porenklasse

Die gesamte Porenoberfläche lässt sich aus der Summe der Oberflächen aller Porenklassen berechnen [50].

3.9.5.3 Der mittlere Porenradius

Das bei der Analyse gemessene gesamte kumulative Porenvolumen wird betrachtet und davon werden 50 % berechnet. Aus der Kurve Porenvolumen gegen Porenradius wird der Radius berechnet, der 50 % des kumulativen Volumens entspricht [50].

3.9.5.4 Gesamtporosität

Die Gesamtporosität stellt das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen des untersuchten Materials dar. Sie ist in [%] angegeben [50].

$$\text{Porosität} = \frac{100 \cdot V_{\text{Poren}}}{V_{\text{Probe}}} \quad \text{Gl. (3.8)}$$

mit:

V_{Poren} = das gemessene Porenvolumen

V_{Probe} = externes Volumen der Probe

3.9.5.5 Rohdichte

Die Rohdichte, auch scheinbare, geometrische Dichte oder Raumbgewicht genannt, ist die Dichte eines porösen Festkörpers basierend auf dem Volumen einschließlich der Porenräume [50].

$$\rho_{\text{roh}} = \frac{m_{\text{Probe}}}{V_{\text{Probe}}} \quad \text{Gl. (3.9)}$$

mit:

V_{Probe} = externes Volumen der Probe

m_{Probe} = Masse der Probe

3.9.5.6 Reindichte

Die Reindichte, auch Skelettdichte oder absolute Dichte genannt, bezeichnet die Dichte des stofflichen Teils eines Körpers. Hier wird also das Volumen der Poren von dem gesamten externen Volumen des Probekörpers abgezogen [50].

$$\rho_{\text{rein}} = \frac{m_{\text{Probe}}}{V_{\text{Probe}} - V_{\text{Poren}}} \quad \text{Gl. (3.10)}$$

mit:

V_{Probe} = externes Volumen der Probe

V_{Poren} = Das gemessene Porenvolumen

m_{Probe} = Masse der Probe

3.9.5.7 Probenvorbereitung

Für diese Arbeit wurde aus der Mitte eines UHPC-Prismas mit einer Steinsäge (siehe Abbildung 3.23) eine Scheibe herausgeschnitten und aus dieser mittels eines Kernbohrers (siehe Abbildung 3.24) drei Bohrkern entnommen. Diese wurden unter fließendem Wasser vorsichtig mit einer Bürste von der Bohrschlemme gesäubert. Um ein Probestück von ca. 1-1,5g Masse zu erhalten muss ein Bohrstück mit 10mm Durchmesser und 6-7 mm Länge herausgebohrt werden.



Abbildung 3.23: Steinsäge zum Sägen der Betonscheiben; Abbildung 3.24: Kernbohrer für die Probestücke

Nachdem man einen brauchbaren Probekörper herausgebohrt hat, wird die Probe bei ca. 20°C und einem Unterdruck von 30 mbar in einem Exsikkator bis zur Massenkonstanz ca. eine Woche getrocknet.

3.9.5.8 Quecksilberporosimetriemessstationen

Für die Durchführung der Quecksilber-Porosimetrie werden ein Niederdruck-Porosimeter PASCAL 140 und ein PASCAL 440, die Hochdruck- Messstation, der Fa. Porotec GmbH verwendet, (siehe Abbildung 3.25).



Abbildung 3.25: v.l.n.r.: Hochdruckmessstation PASCAL 440, Niederdruck-Porosimeter PASCAL 140

Das Niederdruck-Porosimeter PASCAL 140 arbeitet im Druckbereich bis 400 kPa (4 bar). Damit können Makroporen im Bereich von 58 µm bis 1,9 µm und mit einem

Spezial-Dilatometer Ultra-Makroporen im Bereich von 300 μm bis 1,9 μm bestimmt werden. Des Weiteren dient es zur Probenvorbereitung und Füllen der Dilatometer mit Quecksilber unter Vakuum in Verbindung mit der Hochdruckstation *PASCAL 440*. Die Hochdruckstation *PASCAL 440* ermöglicht Porenvolumina bis 500 mm^3 zu erfassen. Der Enddruck ist auf 400 MPa (4000 bar) limitiert. Die kleinsten zu bestimmenden Poren sind 1,8 nm groß. Nach dem Befüllen und der Niederdruckmessung kann der Dilatometer einfach in die Hochdruckstation *PASCAL 440* umgesetzt werden und die Messung kann bei entsprechend höheren Drücken fortgesetzt werden [50].

3.9.5.9 Prüfverfahren

Zuerst wird ein sorgfältig vorbereiteter Prüfkörper in dem Dilatometer platziert und dieser anschließend mit einem eingefetteten Verschluss verriegelt und mit einer Schraube gesichert. Nach dem deponieren des Dilatometers im Porosimeter *PASCAL 140* wird ein Vakuum hergestellt mit einem Unterdruck von 2mbar. Danach beginnt die Befüllung mit Quecksilber und die Analyse kann gestartet werden. Dabei wird in einem Zeitraum von ca. 40 min ein Druck von 140Mpa (1400bar) aufgebaut und hinterher wieder abgebaut. Anschließend wird das Dilatometer wieder ausgebaut und wird, weiterhin gefüllt mit der Probe und dem Quecksilber, abgewogen, bevor es in die Hochdruckmessstation *PASCAL 440* installiert wird. Hier wird das Dilatometer in einem mit Öl gefüllten Zylinder gesetzt und, um die Luft aus der Kapillare des Dilatometers zu entfernen, muss man diese bis zum Rand mit dem Öl anfüllen. Im Verlauf der Analyse wird im *PASCAL 440* ein Druck von bis zu 4000 bar aufgebaut und wieder abgebaut. Die Messwerte der Niederdruck- und der Hochdruckmessungen werden anschließend mit Hilfe der *PASCAL* Software kombiniert und man erhält somit eine komplette Porenweitenverteilung im Meso- und Makroporenbereich.

4 Vorversuch

4.1 Allgemeines

Bevor die eigentliche Versuchsreihe gestartet wurde, ist ein Vorversuch durchgeführt worden. Das Ziel des Vorversuchs war es, die in [8] verwendete Mischrezeptur leicht zu adaptieren um eine etwas bessere Verarbeitbarkeit bei gleicher Festigkeit zu erreichen.

4.2 Vorversuchsdurchführung

Dieser Versuch wurde am 09.03.2009 und am 16.03.09 im Labor des Instituts für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit, in der Adolf-Blamauergasse 1-3 durchgeführt. Es wurden aus 3 verschiedenen Mischrezepturen jeweils 3 Prismen (also insgesamt 9 Prismen) hergestellt. Am 7. Tag wurden Biegezugversuche und Druckversuche durchgeführt und die Ergebnisse untereinander verglichen.

4.2.1 Mischungsberechnungen und Sieblinien, Vorversuch:

Die erste Mischung **M1** ist die Rezeptur, die im Verlauf der Versuche in [8] die besten Ergebnisse geliefert hat. Zu Vergleichszwecken wurden Probekörper mit exakt derselben Rezeptur hergestellt. Die verwendeten Rezepturbestandteile wurden bereits weitgehend in Abschnitt 2.4 beschrieben.

Tabelle 4.1: Sieblinienanalyse Mischung M1, „Bester Wert aus [8]“

Korngemisch		0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Siebmaschenweite[mm]	Anteile [%]	Rückstand [%]												
Quarzsand 0,06/1 (großer Sack im Lager)	75						1,76	2,80	11,38	47,62	10,82	0,62		
Quarzsand 0/1 (Feichtinger)	20						4,68	3,33	3,08	4,23	4,64	0,04		
Quarzmehl 16900	5	0,50	1,00	0,70	1,30	1,35	0,15							
Rückstand gesamt	100	0,50	1,00	0,70	1,30	1,35	6,59	6,13	14,46	51,85	15,46	0,67	0,00	0,00
Siebdurchgang[%]		0,00	0,50	1,50	2,20	3,50	4,85	11,44	17,57	32,03	83,88	99,33	100,00	100,00
Fuller		0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Siebmaschenweite[mm]			2,00	2,70	3,30	4,10	5,00	5,70	7,10	26,70	59,90	100,00	100,00	100,00

In Abbildung 4.1 ist die Sieblinie des Korngemisches und die modifizierte Fuller-Linie in einem Diagramm eingetragen. Man sieht, dass die Sieblinie des Korngemisches doch leicht von der modifizierten Fuller-Linie abweicht.

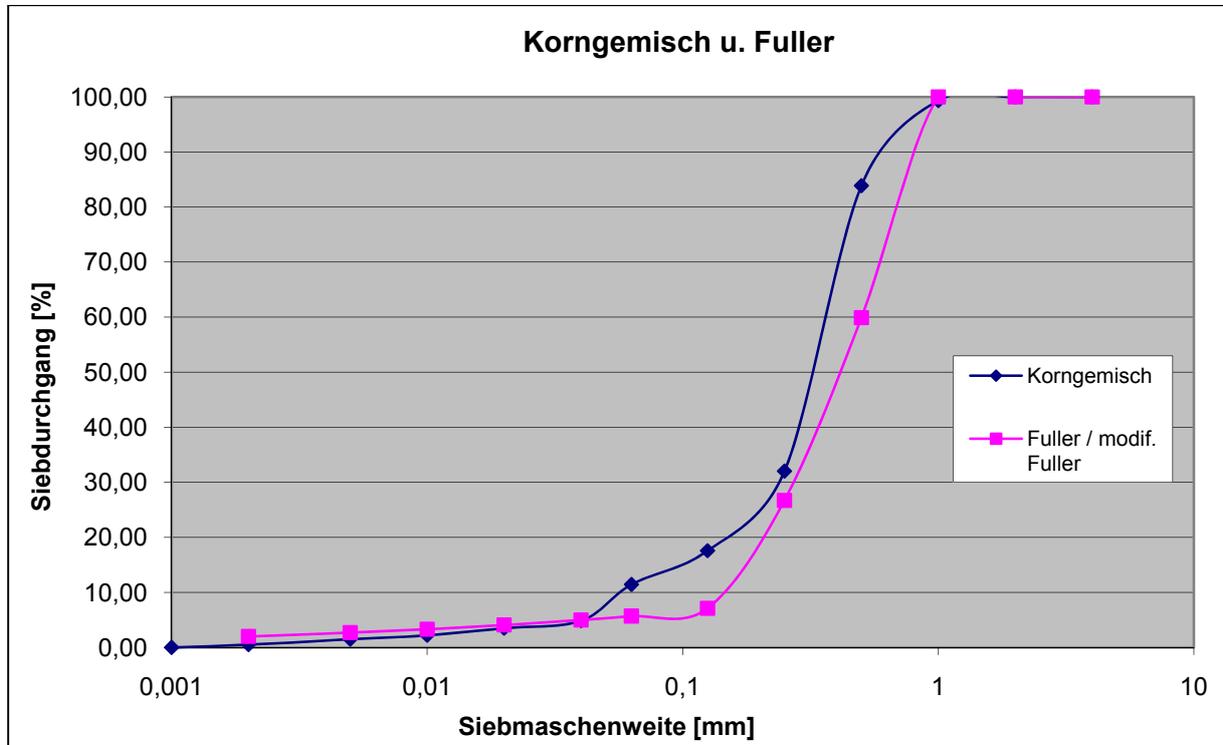


Abbildung 4.1: Sieblinie Korngemisch Mischung M1 und Fullerlinie

Tabelle 4.2: Mischungsberechnung M1

Mischungsberechnung						
durchgeführt von:	Rossbacher					
Ort:	Labor 1003, Adolf-Blamauergasse 1-3					
Datum:	09.03.2009					
Zweck:	DA [Vorversuche] " Bester Wert aus [8]"					
◇ Jene Felder, welche grau hinterlegt sind, müssen eingetragen werden ◇						
1. Anforderungen						
Betonsorte:	UHPC		Zement [kg/m³]	700,00		
Zement:	CEM I /H-S 42,5 R		Zugabe v. ZS [% v. Z-Gew.]	20,00		
Zuschlag:	0-1		k-Wert ZS	2,00		
Zusatzmittel	FM		W/B-Wert	0,175		
Zusatzstoff	MS		Fließmittel % v. Z-Gew.	5,71		
Konsistenz:	Plastisch		Entschäumer % v. FM	0		
			Luftporen (Annahme)	4		
			anrech. BM-Gehalt	854		
2. Stoffbedarf						
	Masse	Rohdichte	Stoffraum			
	[kg]	[kg/dm³]	[dm³]			
Wasser	149,45	1	149,5			
Zement	700,0	3,1	225,8			
Microsilica	140,0	2,3	60,9			
Fließmittel	40,0	1,08	37,0			
Entschäumer	0	0,965	0,000			
Zuschlag	1290,2	2,65	486,9			
Luftporen	0	0	40,0			
Frischbetonrohddichte	2320		1000,0			
3. Bestandteile						
	Anteil	Trockeng.	Rohdichte	Stoffraum	Wassergehalt	GESAMT
	[%]	[kg]	[kg/dm³]	[dm³]	[%]	[l]
Quarzmehl 16900	5,00	64,5	2,65	24,3	0	0
Quarzsand 0/1	20,00	258,0	2,65	97,4	0	0
Quarzsand 06/1	75,00	967,6	2,65	365,1	0	0
***	100	1290,2	2,65	486,9	0	1290,2
				Wasser gesamt [l/m³]:		149,5
4. Mischung						
			Volumen		0,0012	m³
Komponenten	Bezeichnung		Einwaage			
Quarzmehl 16900	Fa. Feichtinger		77,411	g		
Quarzsand 0/1	Fa. Feichtinger		309,646	g		
Quarzsand 06/1	Fa. Kies Union		1161,17	g		
Wasser			0,18	l		
Zement	CEM I /H-S 42,5 R		840,00	g		
Microsilica	Fa. Elkem, Grade 940-U		168,00	g		
Fließmittel	Duriment SF High		47,964	g		
Entschäumer			0,0	g		
5. Mischreihenfolge und Dauer			Mischbehälter	Stiftenwirbler		
Gleichstrommischen	Dauer [s]		Drehzahl [U/min]			
1) Cem, MS, QM	60		Stufe 1	250		
2) QS einfüllen	40		Stufe 1	250		
3) QS	120		Stufe 1	250		
4) Wasser einfüllen+ 1/2 FM	40		Stufe 1	250		
5) Mischen	90		Stufe 1	500		
6) FM einfüllen	40		Stufe 1	500		
7) Nachmischen	120		Stufe 1	500		
8) Enlüften [60 mbar]	180		Stufe 1	250		
SUMME ohne Vak.	510					
SUMME mit Vak.	690					

Die zweite Mischung **M2** „Kein Feichtinger Sand“ ist eine adaptierte Version der Mischung M1. Hierbei wurde der Anteil des Quarzsand 0/1 auf null geändert, der Wasser-Bindemittel-Wert wird von 0,175 auf 0,180 erhöht und der Fließmittelanteil von 5,71% auf 5% reduziert.

Tabelle 4.3: Sieblinienanalyse Mischung M2, „Kein Feichtinger Sand“

Korngemisch		0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Siebmaschenweite[mm]	Anteile [%]	Rückstand %												
Quarzsand 0,06/1	95						2,23	3,55	14,42	60,32	13,70	0,79		
Quarzsand 0/1	0						0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Quarzmehl 16900	5	0,50	1,00	0,70	1,30	1,35	0,15							
Rückstand gesamt	100	0,50	1,00	0,70	1,30	1,35	2,38	3,55	14,42	60,32	13,70	0,79	0,00	0,00
Siebdurchgang[%]		0,00	0,50	1,50	2,20	3,50	4,85	7,23	10,78	25,20	85,51	99,21	100,00	100,00
Fuller		0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4
Siebmaschenweite[mm]			2,00	2,70	3,30	4,10	5,00	5,70	7,10	26,70	59,90	100,00	100,00	100,00

Wie man in Abbildung 4.2 erkennen kann, wird durch das Weglassen des Quarzsand 0/1 die modifizierte Fullерlinie besser angenähert.

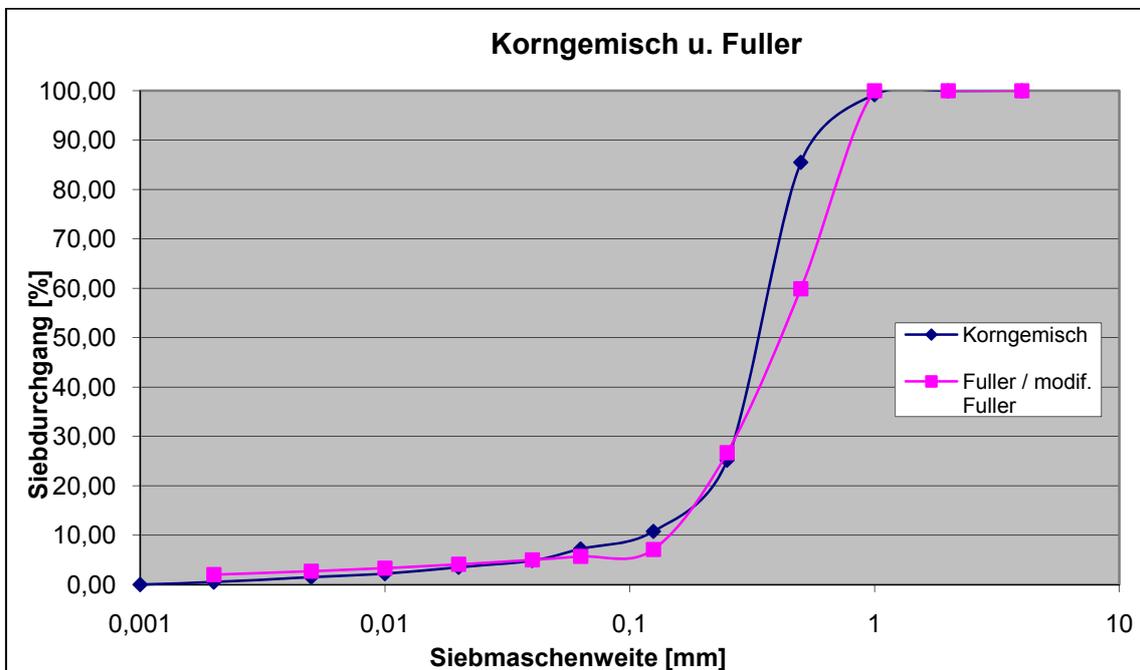


Abbildung 4.2: Sieblinie Korngemisch M2 und Fullerlinie

In der nachfolgenden Tabelle 4.4 sind die Mischrezeptur und die Zeiträume der Mischphasen eingetragen.

Tabelle 4.4 Mischungsberechnung M2

Mischungsberechnung						
durchgeführt von:	Rossbacher					
Ort:	Labor 1003, Adolf-Blamauergasse 1-3					
Datum:	09.03.2009					
Zweck:	DA [Vorversuche] "ohne Feichtinger Sand"					
◇ Jene Felder, welche grau hinterlegt sind, müssen eingetragen werden ◇						
1. Anforderungen						
Betonsorte:	UHPC		Zement [kg/m ³]	700,00		
Zement:	CEM I /H-S 42,5 R		Zugabe v. ZS [% v. Z-Gew.]	20,00		
Zuschlag:	0-1		k-Wert ZS	2,00		
Zusatzmittel	FM		W/B-Wert	0,180		
Zusatzstoff	MS		Fließmittel % v. Z-Gew.	5		
Konsistenz:	plastisch		Entschäumer % v. FM	0		
			Luftporen (Annahme)	4		
			anrech. BM-Gehalt	854		
2. Stoffbedarf						
	Masse	Rohdichte	Stoffraum			
	[kg]	[kg/dm ³]	[dm ³]			
Wasser	153,72	1	153,7			
Zement	700,0	3,1	225,8			
Microsilica	140,0	2,3	60,9			
Fließmittel	35,0	1,08	32,4			
Entschäumer	0	0,965	0,000			
Zuschlag	1291,1	2,65	487,2			
Luftporen	0	0	40,0			
Frischbetonrohddichte	2320		1000,0			
3. Bestandteile						
	Anteil	Trockeng.	Rohdichte	Stoffraum	Wassergehalt	GESAMT
	[%]	[kg]	[kg/dm ³]	[dm ³]	[%]	[l]
Quarzmehl 16900	5,00	64,6	2,65	24,4	0	0
Quarzsand 0/1	0,00	0,0	2,65	0,0	0	0
Quarzsand 06/1	95,00	1226,5	2,65	462,8	0	0
***	100	1291,1	2,65	487,2	0	1291,1
				Wasser gesamt [l/m³]:		153,7
4. Mischung						
			Volumen		0,0012	m ³
Komponenten	Bezeichnung		Einwaage			
Quarzmehl 16900	Fa. Feichtinger		77,464	g		
Quarzsand 0/1	Fa. Feichtinger		0,000	g		
Quarzsand 06/1	Fa. Kies Union		1471,82	g		
Wasser			0,18	l		
Zement	CEM I /H-S 42,5 R		840,00	g		
Microsilica	Fa. Elkem, Grade 940-U		168,00	g		
Fließmittel	Duriment SF High		42	g		
Entschäumer			0,0	g		
5. Mischreihenfolge und Dauer			Mischbehälter		Stiftenwirbler	
Gleichstrommischen	Dauer [s]		Drehzahl [U/min]			
1) Cem, MS, QM	120		Stufe 1		250	
2) QS einfüllen	30		Stufe 1		250	
3) QS	90		Stufe 1		250	
4) Wasser einfüllen+ 1/2 FM	30		Stufe 1		250	
5) Mischen	90		Stufe 1		500	
6) FM Rest einfüllen	30		Stufe 1		500	
7) Nachmischen	240		Stufe 1		750	
8) Enlüften [60 mbar]	180		Stufe 1		250	
SUMME ohne Vak.	630					
SUMME mit Vak.	810					

Die Dritte Mischung **M3** „Kein Feichtinger Sand, Fließmittelanteil 7%“ ist bis auf eine Erhöhung des Fließmittelanteils von 5% auf 7% und eine Änderung der Annahme des Luftporenanteils von 4% auf 2%, exakt gleich wie die Mischung M2. Das heißt, die Sieblinienanalyse und die Sieb- bzw. Fullerlinie ist ident mit der der Mischung M2. Tabelle 4.5 zeigt die Mischrezeptur und die Zeiträume in den einzelnen Mischphasen.

Tabelle 4.5: Mischungsberechnung M3

Mischungsberechnung							
durchgeführt von:	Rossbacher						
Ort:	Labor 1003, Adolf-Blamauergasse 1-3						
Datum:	16.06.2009						
Zweck:	DA [Vorversuche] "Ohne Feichtinger Sand +7%FM"						
◇ Jene Felder, welche grau hinterlegt sind, müssen eingetragen werden ◇							
1. Anforderungen							
Betonsorte:	UHPC		Zement [kg/m ³]	700,00			
Zement:	CEM I /H-S 42,5 R		Zugabe v. ZS [% v. Z-Gew.]	20,00			
Zuschlag:	0-1		k-Wert ZS	2,00			
Zusatzmittel	FM		W/B-Wert	0,180			
Zusatzstoff	MS		Fließmittel % v. Z-Gew.	7			
Konsistenz:	plastisch		Entschäumer % v. FM	0			
			Luftporen (Annahme)	2			
			anrech. BM-Gehalt	854			
2. Stoffbedarf							
	Masse	Rohdichte	Stoffraum				
	[kg]	[kg/dm ³]	[dm ³]				
Wasser	153,72	1	153,7				
Zement	700,0	3,1	225,8				
Microsilica	140,0	2,3	60,9				
Fließmittel	49,0	1,08	45,4				
Entschäumer	0	0,965	0,000				
Zuschlag	1309,7	2,65	494,2				
Luftporen	0	0	20,0				
Frischbetonrohddichte	2352		1000,0				
3. Bestandteile							
	Anteil	Trockeng.	Rohdichte	Stoffraum	Wassergehalt		GESAMT
	[%]	[kg]	[kg/dm ³]	[dm ³]	[%]	[l]	[kg/m ³]
Quarzmehl 16900	5,00	65,5	2,65	24,7	0	0	65,5
Quarzsand 0/1	0,00	0,0	2,65	0,0	0	0	0,0
Quarzsand 06/1	95,00	1244,2	2,65	469,5	0	0	1244,2
***	100	1309,7	2,65	494,2		0	1309,7
				Wasser gesamt [l/m³]:			153,7
4. Mischung							
			Volumen		0,0012	m³	
Komponenten	Bezeichnung		Einwaage				
Quarzmehl 16900	Fa. Feichtinger		78,583	g			
Quarzsand 0/1	Fa. Feichtinger		0,000	g			
Quarzsand 06/1	Fa. Kies Union		1493,08	g			
Wasser			0,18	l			
Zement	CEM I /H-S 42,5 R		840,00	g			
Microsilica	Fa. Elkem, Grade 940-U		168,00	g			
Fließmittel	Duriment SF High		58,8	g			
Entschäumer			0,0	g			
5. Mischreihenfolge und Dauer			Mischbehälter		Stiftenwirbler		
Gleichstrommischen	Dauer [s]		Drehzahl [U/min]				
1) Cem, MS, QM	120		Stufe 1		250		
2) QS einfüllen	30		Stufe 1		250		
3) QS	90		Stufe 1		250		
4) Wasser einfüllen+ 1/2 FM	30		Stufe 1		250		
5) Mischen	90		Stufe 1		500		
6) FM Rest einfüllen	30		Stufe 1		500		
7) Nachmischen	240		Stufe 1		750		
8) Enlüften [60 mbar]	180		Stufe 1		250		
SUMME ohne Vak.	630						
SUMME mit Vak.	810						

4.2.2 Frischbetonprüfungen, Vorversuch

Direkt nach dem Mischen des Frischbetons wurden die in Abschnitt 3.6 beschriebenen Frischbetonprüfungen durchgeführt. Es sind folgende Ergebnisse zustande gekommen.

4.2.2.1 Ausbreitmaß, Vorversuch

Die in der Abbildung 4.3 angeführten Ergebnisse des Ausbreitmaßversuchs zeigen klar, dass die Mischung M3 gegenüber den anderen Mischungen eine wesentlich bessere Verarbeitbarkeit besitzt. Offensichtlich verlieh die erhöhte Zugabe von Fließmittel dem Beton eine weichere Konsistenz.

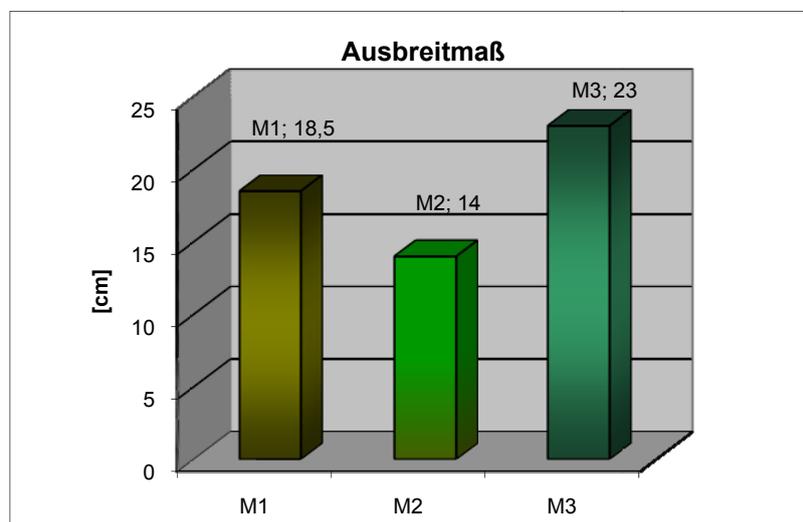


Abbildung 4.3: Ergebnisse des Ausbreitmaßes VV

4.2.2.2 Frischbetonrohddichte, Vorversuch

In Abbildung 4.4 sind die Ergebnisse der Ermittlung der Frischbetonrohddichten dargestellt. Wie man sehen kann, sind die höchsten Rohddichten mit der Mischung M1 zu erreichen.

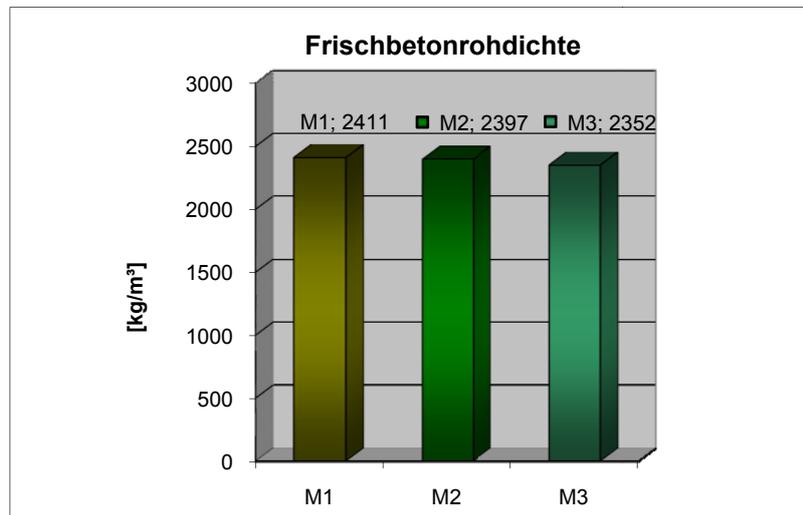


Abbildung 4.4: Ergebnisse der Frischbetonrohddichte VV

4.2.2.3 Frischbetonluftgehalt, Vorversuch

Die in der Abbildung 4.5 angeführten Ergebnisse der Ermittlung des Luftgehalts zeigen klar, dass die niedrigsten Werte die Mischung M1 und die Mischung M3 erreicht haben.

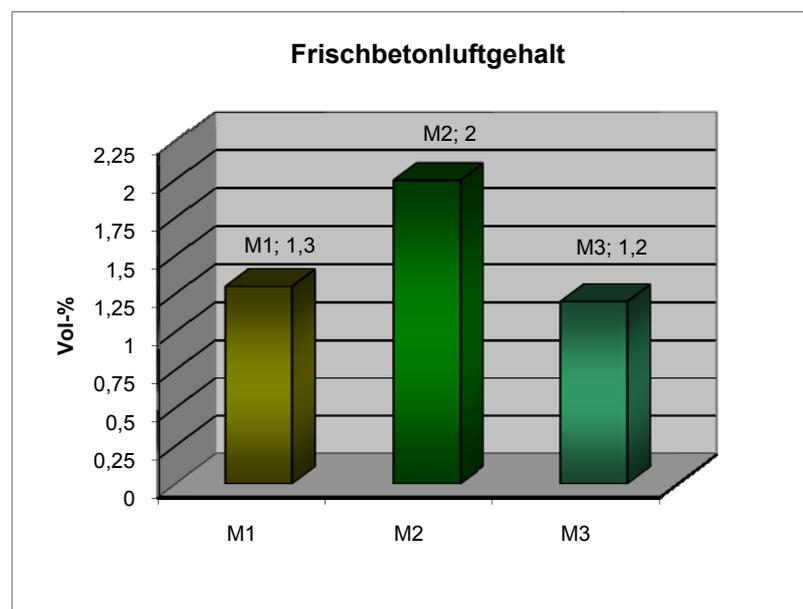


Abbildung 4.5: Ergebnisse des Frischbetonluftgehalts VV

4.2.3 Festbetonprüfungen, Vorversuch

Die in den angeführten Diagrammen enthaltenen Werte verstehen sich als die Mittelwerte der jeweils 3 Proben (Bei Biegezugversuchen) beziehungsweise 6 Proben (Bei den Druckversuchen, jeweils mit beiden Prismenhälften durchgeführt).

4.2.3.1 Biegezugfestigkeiten, Vorversuch

Die in Abbildung 4.6 dargestellten Biegezugfestigkeiten der 3 verschiedenen Mischungen zeigen keine eklatanten Unterschiede.

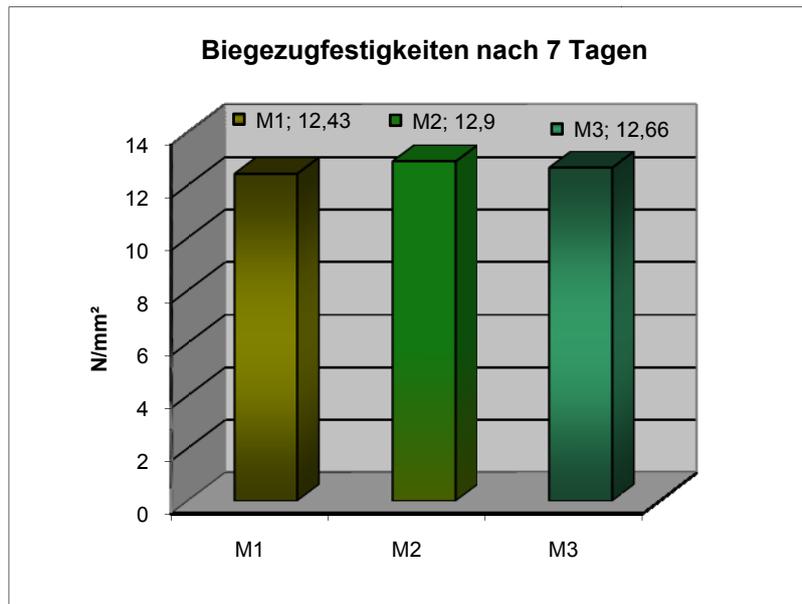


Abbildung 4.6: Gegenüberstellung der Ergebnisse Biegezugfestigkeitsversuche VV

4.2.3.2 Druckfestigkeiten, Vorversuch

Bei den Ergebnissen der Druckfestigkeiten haben die Proben der Mischung M2 die höchsten Werte erreicht. Die Ergebnisse der Mischung M3 liegen abgeschlagen auf dem letzten Platz, (siehe Abbildung 4.7).

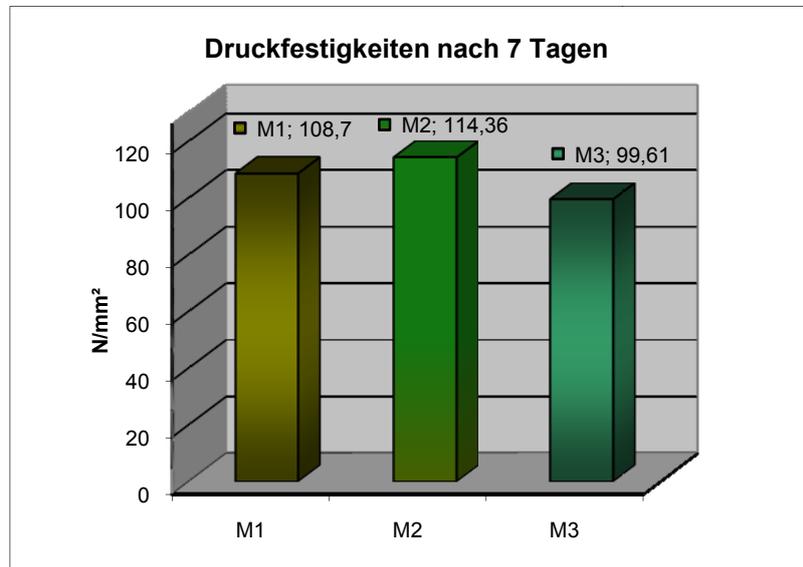


Abbildung 4.7: Gegenüberstellung der Ergebnisse Druckversuche VV

4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse, Vorversuch

Die Mischung M2 hat zwar in den Festigkeitsprüfungen um 3,78% (Biegezugversuch) und um 5,21% (Druckversuch) höhere Werte erreicht als die „Referenz“- Mischung M1, konnte jedoch das Ziel eine bessere Verarbeitbarkeit zu besitzen, nicht erreichen. Hier war das Ausbreitmaß der Mischung M2 (14cm) um 32,14% niedriger als das der Mischung M2 (18,5cm). Somit kam die Mischung M2 als Grundlage für die Hauptversuche nicht mehr in Frage.

Bei der Mischung M3 hingegen kamen genau entgegen gesetzte Prüfergebnisse zustande. Hier konnte bei der Verarbeitbarkeit eine gewünschte Erhöhung von 24,32% gegenüber der Mischung M1, auf 23cm, erreicht werden. Die Druckfestigkeiten nahmen aber um 9,13% ab.

Anhand der Ergebnisse der Frischbeton- und der Festbetonprüfungen wurde festgestellt, dass keine der beiden adaptierten Rezepturen zu zufrieden stellenden Ergebnissen geführt hat. Da es nicht das Ziel dieser Arbeit war, eine völlig neue Rezeptur zu entwickeln und außerdem eine Vergleichbarkeit mit [8] hinsichtlich der Betoneigenschaften gewahrt werden sollte, wurde die Mischung „beste Mischung“ nach Verbesserung der Verarbeitbarkeit aus [8] übernommen.

5 Hauptversuche

5.1 Allgemeines

Wie schon in der Motivation erwähnt, ist das Ziel dieser Arbeit, den Einfluss der verschiedenen Nachbehandlungsmethoden im Zusammenhang mit dem Vakuummischprozess auf ultrahochfeste Betone darzustellen. Die Details beziehungsweise die Beschreibung der Durchführung der einzelnen Frischbeton- und Festbetonprüfungen werden im Abschnitt 3.6 und Abschnitt 3.9 genau beschrieben.

5.2 Prüfplan

Um die verfügbaren Ressourcen, wie die Probenschalungen oder den für die Nachbehandlungen benötigten Ofen, im Institutslabor optimal nutzen zu können, wurde ein Zeitplan für die Durchführung jedes einzelnen Schrittes während der Prüfungen, beziehungsweise der Mischvorgänge entworfen. Da nicht genug Schalungen vorhanden waren um alle Probekörper gleichzeitig herzustellen, wurden die Mischarbeiten auf vier Tage aufgeteilt. In Tabelle 5.1 sind die jeweiligen Termine der Misch- und Prüftage jeder Prüfserie eingetragen sind. Nach jedem Mischvorgang sind alle genannten Frischbetonprüfungen durchgeführt worden. An jedem Tag an dem die Probekörper im Zuge derer Nachbehandlung eine Änderung der Lagebedingungen erfahren haben, wurden mechanische Bruchversuche durchgeführt. Am 28.Tag sind neben den Festigkeitsprüfungen auch die Probestücke für die Porosimetermessungen aus den zerstörten Prismen der Biegezugfestigkeitsprüfung herausgebohrt worden. Nachdem die gebohrten Probestücke bis zu Massenkonstanz in einem Exsikkator unter 30mbar Vakuum getrocknet worden sind, wurden die Quecksilberporosimetrien durchgeführt.

Tabelle 5.1: Prüfplan

		ÖNorm B3303, Nachbehandlung 1	Raumluft 20°C, Nachbehandlung 2	Warmwasser- behandlung 90°C, Nachbehandlung 3	Warmofenbehandlung 1 90°C, Nachbehandlung 4	Warmofenbehandlung 2 250°C, Nachbehandlung 5	Warmwasser- plus Warmofenbehandlung, Nachbehandlung 6	
04.Nov	Mi	1.Mischtag/PO						
05.Nov	Do	P1-n						
06.Nov	Fr							
07.Nov	Sa							
08.Nov	So							
09.Nov	Mo	P4-2/4/5		2.Mischtag/PO				
10.Nov	Di							
11.Nov	Mi			P2-3				
12.Nov	Do			P8-1/6				
13.Nov	Fr			P4-3	P4-4=P4-2			
14.Nov	Sa							
15.Nov	So							
16.Nov	Mo							
17.Nov	Di	P15-1	P15-2			3.Mischtag/PO		
18.Nov	Mi							
19.Nov	Do					P8-4		
20.Nov	Fr							
21.Nov	Sa					P4-5=P4-2		
22.Nov	So							
23.Nov	Mo							
24.Nov	Di					P15-3		P15-4
25.Nov	Mi						P8-6=P8-1	
26.Nov	Do							
27.Nov	Fr							
28.Nov	Sa						P12-5	P10-6
29.Nov	So						P12-6	
30.Nov	Mo							
01.Dez	Di							
02.Dez	Mi						P28-1	P28-2
03.Dez	Do						P15-5	
04.Dez	Fr							
05.Dez	Sa							
06.Dez	So							
07.Dez	Mo			P28-3	P28-4			
08.Dez	Di							
09.Dez	Mi							
10.Dez	Do							
11.Dez	Fr							
12.Dez	Sa							
13.Dez	So							
14.Dez	Mo							P28-5
15.Dez	Di							
16.Dez	Mi							
					Legende:			
							Raumluft ~20°C	
							Wasserbad ~20°C	
							Warmwasserbad ~90°C	
Erklärung der Bezeichnung:							Ofen 90°C	
P.....Prüfung							Ofen 250°C	
erste Ziffer.....Prüfungstag ab dem jeweiligen Mischtag							Ofen 200°C	
zweite Ziffer.....Nachbehandlungsnummer								

5.3 Mischrezeptur der Hauptversuche

Die bei den Hauptversuchen verwendete Mischrezeptur ist im Prinzip die Mischung aus [8]. Es wurde lediglich der Fließmittelgehalt von 5,75 % auf 7% für eine bessere Verarbeitbarkeit erhöht, und die Mischdauer etwas geändert.

Tabelle 5.2: Mischungsberechnung des Betons der Hauptversuche

Mischungsberechnung							
durchgeführt von:	Ludwig Rossbacher						
Ort:	Labor 1003, Adolf-Blamauergasse 1-3						
Datum:	04.11.2009						
Zweck:	DA [Hauptversuche]						
◊ Jene Felder, welche grau hinterlegt sind, müssen eingetragen werden ◊							
1. Anforderungen							
Betonsorte:	UHPC		Zement [kg/m³]			700,00	
Zement:	CEM I /H-S 42,5 R		Zugabe v. ZS [% v. Z-Gew.]			20,00	
Zuschlag:	0-1		k-Wert ZS			2,00	
Zusatzmittel	FM		W/B-Wert			0,175	
Zusatzstoff	MS		Fließmittel % v. Z-Gew.			7	
Konsistenz:	plastisch		Entschäumer % v. FM			0	
			Luftporen (Annahme)			4	
			anrech. BM-Gehalt			854	
2. Stoffbedarf							
	Masse	Rohdichte	Stoffraum				
	[kg]	[kg/dm³]	[dm³]				
Wasser	149,45	1	149,5				
Zement	700,0	3,1	225,8				
Microsilica	140,0	2,3	60,9				
Fließmittel	49,0	1,08	45,4				
Entschäumer	0	0,965	0,000				
Zuschlag	1268,0	2,65	478,5				
Luftporen	0	0	40,0				
Frischbetonrohddichte	2306		1000,0				
3. Bestandteile							
	Anteil	Trockeng.	Rohdichte	Stoffraum	Wassergehalt		GESAMT
	[%]	[kg]	[kg/dm³]	[dm³]	[%]	[l]	[kg/m³]
Quarzmehl 16900	5,00	63,4	2,65	23,9	0	0	63,4
Quarzsand 0/1	20,00	253,6	2,65	95,7	0	0	253,6
Quarzsand 06/1	75,00	951,0	2,65	358,9	0	0	951,0
***	100	1268,0	2,65	478,5	0	0	1268,0
				Wasser gesamt [l/m³]:			149,5
4. Mischung							
			Volumen		0,0024	m³	
Komponenten	Bezeichnung		Einwaage				
Quarzmehl 16900	Fa. Feichtinger		152,164	g			
Quarzsand 0/1	Fa. Feichtinger		608,657	g			
Quarzsand 06/1	Fa. Kies Union		2282,46	g			
Wasser			0,36	l			
Zement	CEM I /H-S 42,5 R		1680,00	g			
Microsilica	Fa. Elkem, Grade 940-U		336,00	g			
Fließmittel	Duriment SF High		117,6	g			
Entschäumer			0,0	g			
5. Mischreihenfolge und Dauer			Mischbehälter		Stiftenwirbler		
Gleichstrommischen	Dauer [s]		Drehzahl [U/min]				
1) Cem, MS,QM	90		Stufe 1		950		
2) QS einfüllen	30		Stufe 1		250		
3) QS	90		Stufe 1		950		
4) Wasser einfüllen+1/2 FM	30		Stufe 1		950		
5) Mischen	120		Stufe 1		950		
6) FM einfüllen	30		Stufe 1		950		
7) Nachmischen	360		Stufe 1		950		
8) Enlüften [60 mbar]	160		Stufe 1		250		
SUMME ohne Vak.	750						
SUMME mit Vak.	910						

5.4 Frischbetonergebnisse:

Nach jedem Mischvorgang wurden das Ausbreitmaß, die Frischbetonrohichte und der Frischbetonluftgehalt ermittelt. Jede Mischung ist nummeriert und eindeutig einer Prüfserie und einem Prüfzeitpunkt zugeordnet. In den folgenden Ergebnistabellen sind die Bezeichnungen wie folgt zu verstehen. *M 1 V* bedeutet zum Beispiel, dass es sich hier um die erste Mischung handelt und mit dem Vakuummischprozess hergestellt wurde. Ein nachgestelltes *NV* bedeutet, dass dieser Beton ohne Vakuum gemischt wurde.

Insgesamt wurden 24 Mischungen, 12 mit 60 mbar Vakuum und 12 ohne Vakuum, mit jeweils ca. 2,4 Liter Volumen hergestellt.

5.4.1 Ausbreitmaß

Stellt man die gemittelten Ergebnisse über jeweils alle Nichtvakuummischungen und alle Vakuummischungen gegenüber, so kommt man auf folgendes Ergebnis:

Im Durchschnitt ist das Ausbreitmaß der Nichtvakuummischungen mit 21,5cm um 7,2% höher als das Ausbreitmaß der mit Vakuum hergestellten Mischungen (20,05cm). Daraus kann man erkennen, dass durch das Entziehen von Luft während des Mischens des Betons eine kompaktere Masse entsteht, die dementsprechend zähflüssiger ist, als normalgemischter Beton. Die Ergebnisse des Ausbreitmaßversuchs aller Nachbehandlungen sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

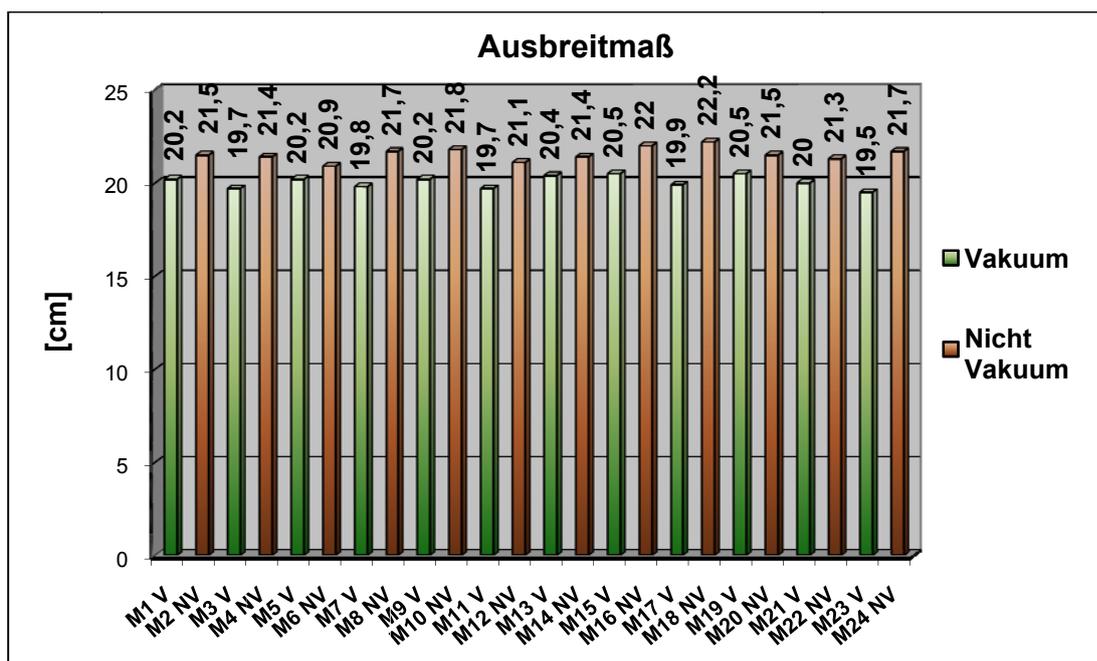


Abbildung 5.1: Ergebnisse des Ausbreitmaßversuchs

5.4.2 Frischbetonrohddichte

Hier zeigt sich, dass im Durchschnitt die Rohddichte der Vakuummischungen mit $2422,54 \text{ kg/m}^3$ um 6,6% höher ist als die Rohddichte der Nichtvakuummischungen mit $2270,66 \text{ kg/m}^3$. Dieses Ergebnis lässt sich ebenfalls durch den geringeren Luftgehalt im Vakuumbeton erklären. Die Ergebnisse der Ermittlung der Frischbetonrohddichten aller Nachbehandlungen sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

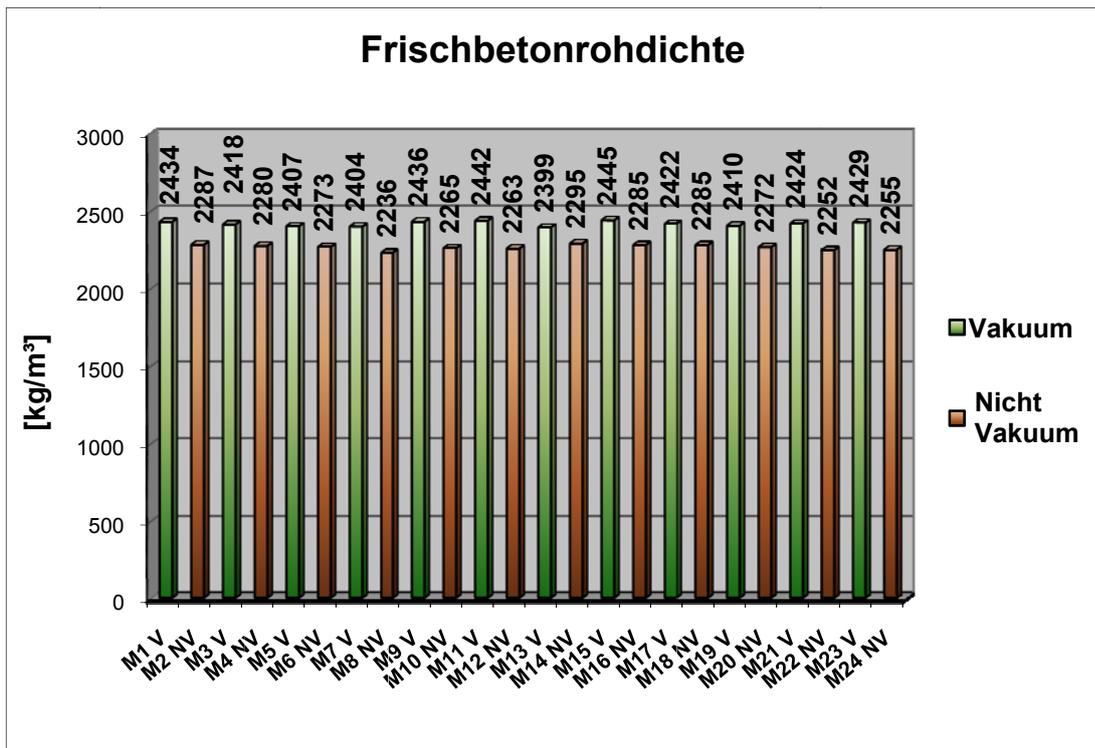


Abbildung 5.2: Ergebnisse der Ermittlung der Frischbetonrohddichte

5.4.3 Frischbetonluftgehalt

Im Durchschnitt ergibt sich, dass der Luftgehalt der vakuumgemischten Frischbetone 0,76% vom Volumen beträgt. Die nichtvakuumgemischten Betone kommen hingegen auf einen durchschnittlichen Frischbetonluftgehalt von 5,48%. Die durchschnittliche Differenz von 4,72% ergibt sich dadurch, dass durch den aufgetragenen 60mbar Unterdruck während der Vakuummischphase, dem vakuumgemischten Beton eine gewisse Menge Luft entzogen wurde. Die Frischbetonluftgehalte der Mischungen aller Nachbehandlungen sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

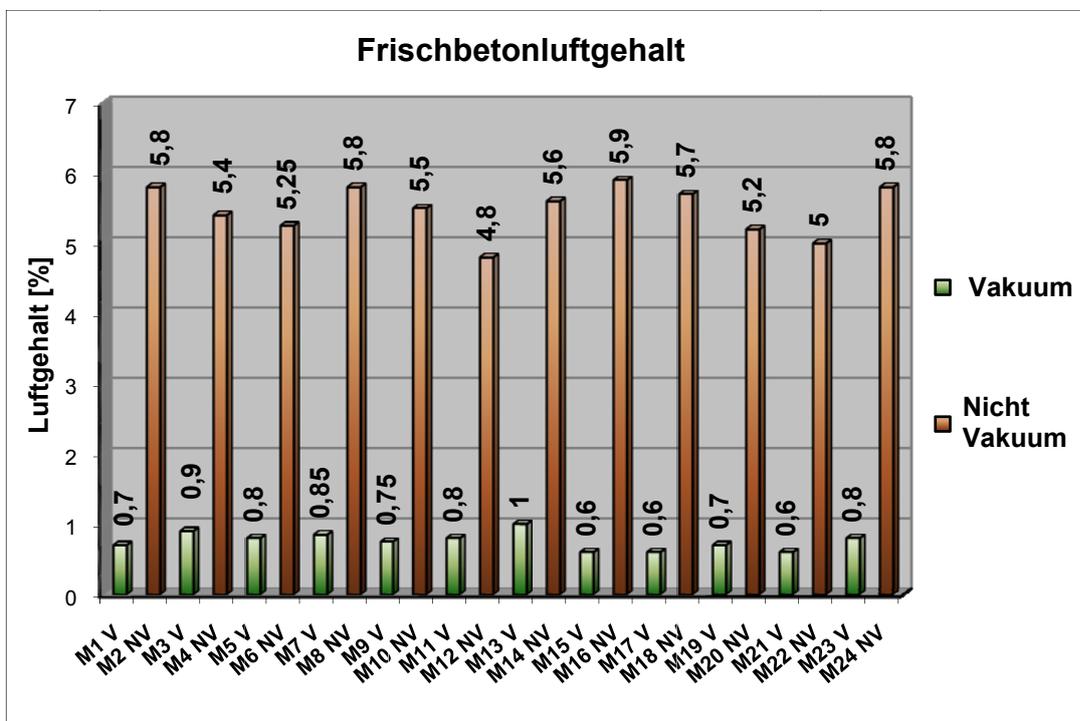


Abbildung 5.3: Ergebnisse der Ermittlung des Luftgehalts

5.5 Festbetonversuchsergebnisse

Jedes Prüfprisma ist mit einer unverwechselbaren eindeutigen Beschriftung ausgestattet, die alle wichtigen Informationen beinhaltet. So ist jeder Probekörper einer Mischung und einer der 6 Nachbehandlungsmethoden zugeordnet. Hier 2 Beispiele um die Probenbezeichnung verständlich zu machen.

In *M7_NB2_1;28V* bedeutet *M7* Mischung 7, *NB2* Nachbehandlung 2, *1* bedeutet Probekörper 1 aus dieser Serie von 3 Probekörpern. Die Zahl 28 gibt darüber Auskunft, dass diese Serie am 28.Tag nach dem Ausschalen geprüft wurde. Das *V* bedeutet, dass diese Mischung mit dem Vakuummischprozess hergestellt wurde.

Wenn nach dem Kürzel *NB* ein *n* oder mehrere durch Schrägstriche getrennte Ziffern stehen, so bedeutet das, dass die Ergebnisse dieser Serie entweder für mehrere oder alle Nachbehandlungen gelten (bei *n*). Dies kann deshalb vorkommen, weil gewisse Nachbehandlungen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt gleiche Lagerungsbedingungen vorschreiben.

M4_NB1/6_1;8 bedeutet demnach, dass dieser Prüfkörper aus der Mischung 4 entstammt, für die Nachbehandlungsmethoden 1 und 6 gilt, und am 8.Tag nach dem Ausschalen geprüft wurde.

5.5.1 Festbetonrohichte

Die Ergebnisse der Festbetonrohichten sind in den folgenden 6 Diagrammen nach den einzelnen Nachbehandlungsmethoden gegliedert. Hier kann man gut den Verlauf der Veränderung der Dichten im Zusammenhang mit der vorangegangenen Lagerung erkennen. Die Ergebnisse sind als Mittelwert der 3 für jede Probenserie hergestellten Prismen zu verstehen.

Wichtig zu erwähnen ist, dass die Mess- und Wiegegenauigkeit bei den 160x40x40mm Proben, wie sie für diese Arbeit verwendet wurden, die Ergebnisse höher beeinflussen kann, als bei den sonst üblichen 150x150x150mm Würfeln. Da die Prismen an einer Seite herstellungsbedingt nie ganz plan aushärten, kann es vor allem bei den Prismenabmessungen leicht zu Fehlern kommen. Außerdem können ungewünschte eingeschlossene Verdichtungsporen das Ergebnis verfälschen.

In Abbildung 5.4 kann man gut erkennen, dass die Festbetonrohddichten der mit 60mbar Unterdruck behandelten Proben um ca. 3% höher sind als die Dichten der ohne Vakuum hergestellten Proben. Außerdem sieht man, dass sich die Rohddichten nach dem 8.Tag, dem Tag an dem die Proben aus dem 20°C warmen Wasser an die Raumluft gelegt wurden, leicht gesunken sind. Daraus kann man schließen, dass das Wasser das während der Lagerung im Wasserbecken in die Poren des Betons eingedrungen ist, in dieser Zeit verdunstet ist.

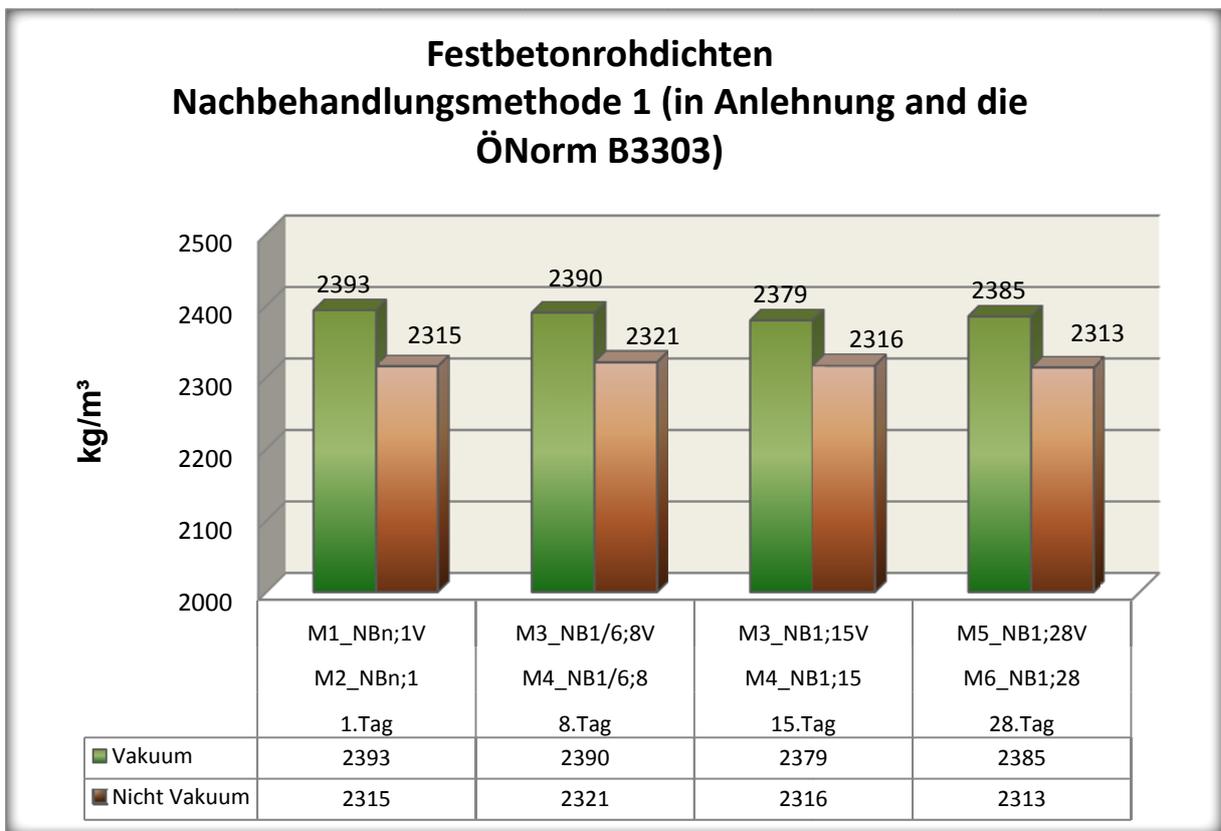


Abbildung 5.4: Festbetonrohddichten Nachbehandlungsmethode 1 nach Tabelle 3.7

In der Abbildung 5.5 ist die Differenz zwischen den Rohdichten der Vakuum- und Nichtvakuumbetone ähnlich hoch wie in der Abbildung 5.4. Ebenfalls sinken die Rohdichten der nichtvakuumgemischten Proben bis zum 28. Tag stetig ab. Die der vakuumgemischten Proben bleibt hingegen auf demselben Niveau. Diese Gewichtsabnahme ist in der Regel unüblich, da durch das Schwinden und Schrumpfen des Betons eigentlich eine Zunahme der Rohdichten stattfinden sollte.

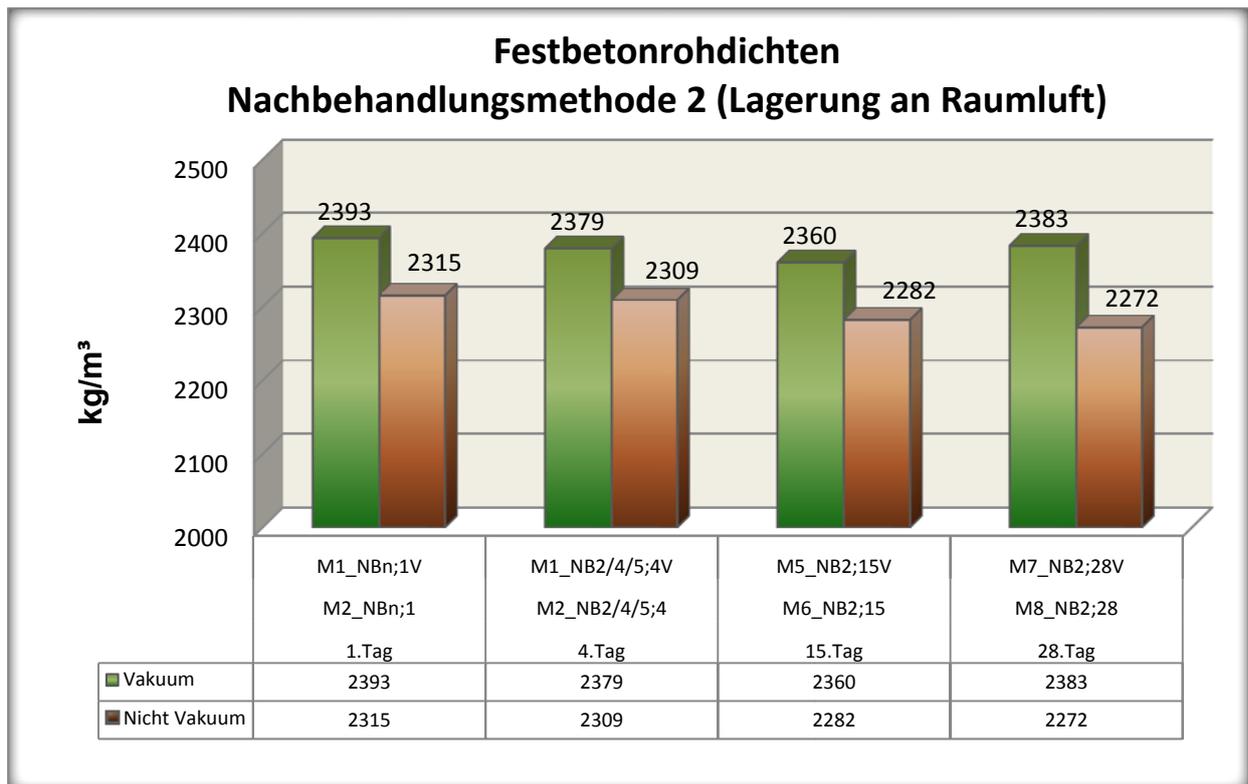


Abbildung 5.5: Festbetonrohddichten Nachbehandlungsmethode 2 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.6 erkennt man, dass die Rohdichten vom 2. auf den 4.Tag wieder ein wenig steigen. In diesem Zeitraum lagen die Proben in einem Warmwasserbecken mit 90°C Wassertemperatur. Dort wurden offensichtlich die Poren wieder mit Wasser gefüllt, was zu einer Erhöhung der Rohdichte führte. Dieser Effekt ist besonders bei den nichtvakuumgemischten Proben zu beobachten, die offensichtlich mehr Kapillarporen in ihrer Struktur aufweisen die mehr Wasser aufnehmen konnten. Bis zum 28.Tag ist aber wieder eine Abnahme der Rohdichten zu beobachten.

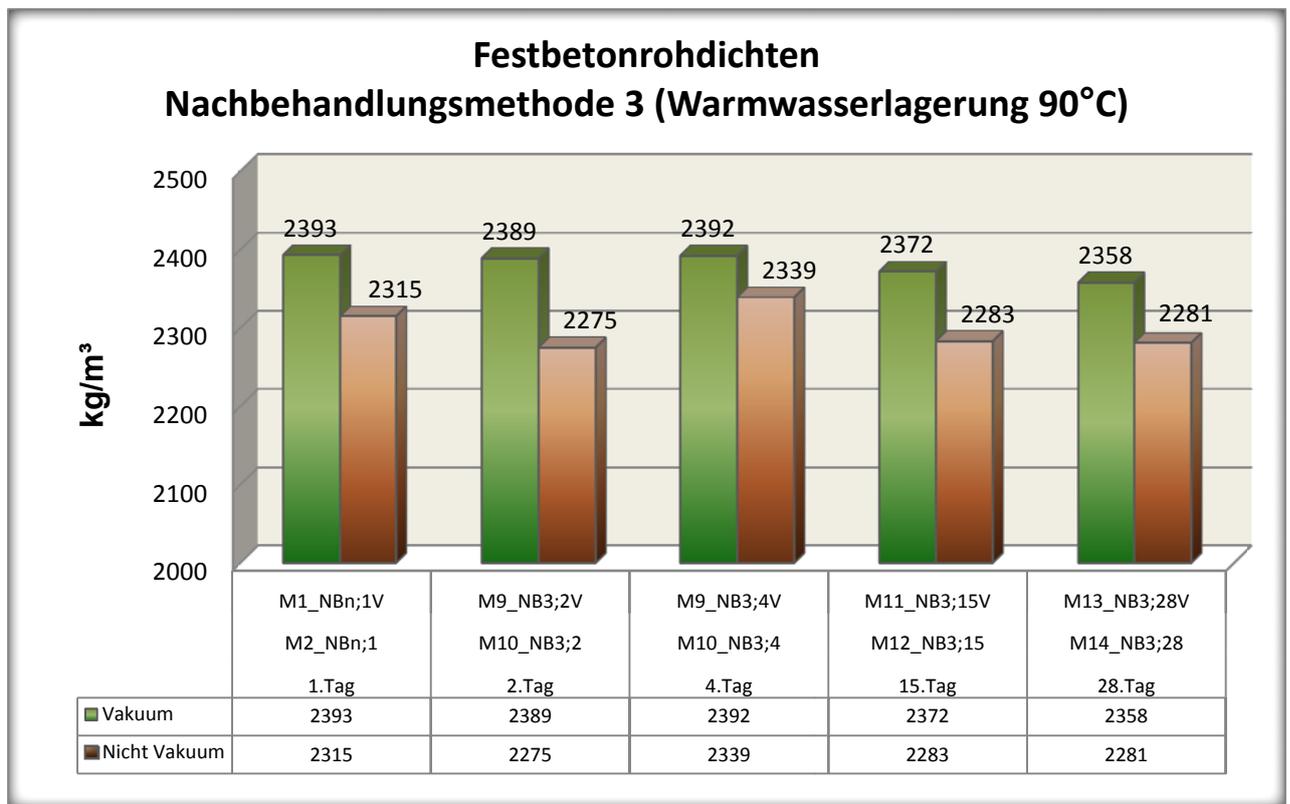


Abbildung 5.6: Festbetonrohddichten Nachbehandlungsmethode 3 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.7 erkennt man vom 4. auf den 8.Tag einen Rückgang der Festbetonrohddichte der vakuumgemischten Proben um 2,4%, beziehungsweise um 2,6% bei den nichtvakuumgemischten Proben. Dies ist auf das erhöhte Verdunsten des Porenwassers während der Lagerung im Ofen bei 90°C zurückzuführen.

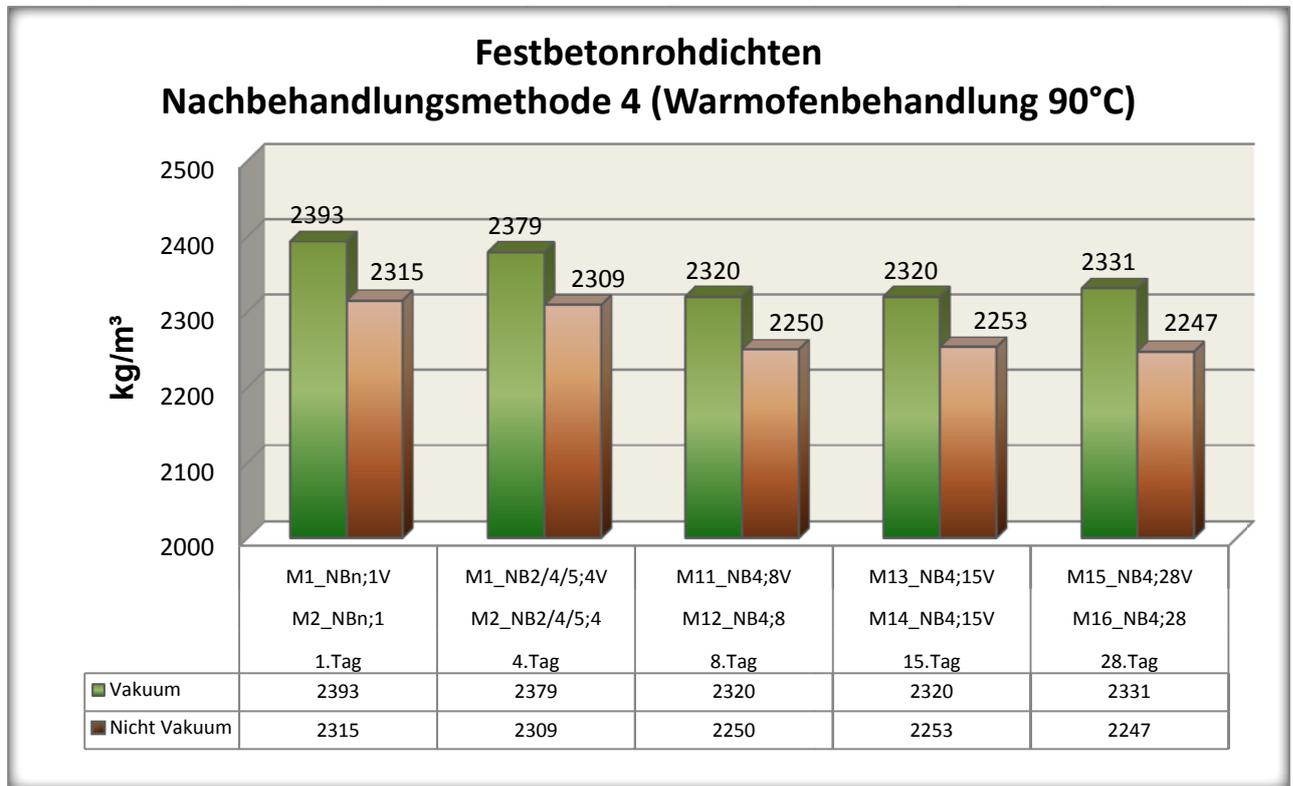


Abbildung 5.7: Festbetonrohddichten Nachbehandlungsmethode 4 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.8 ebenfalls ein Rückgang der Rohdichte von 3,9% (Vakuum) beziehungsweise 4,9% (Nichtvakuum) innerhalb der 7 Tage in denen die Proben in dem 250°C temperierten Ofen gelagert sind, zu erkennen.

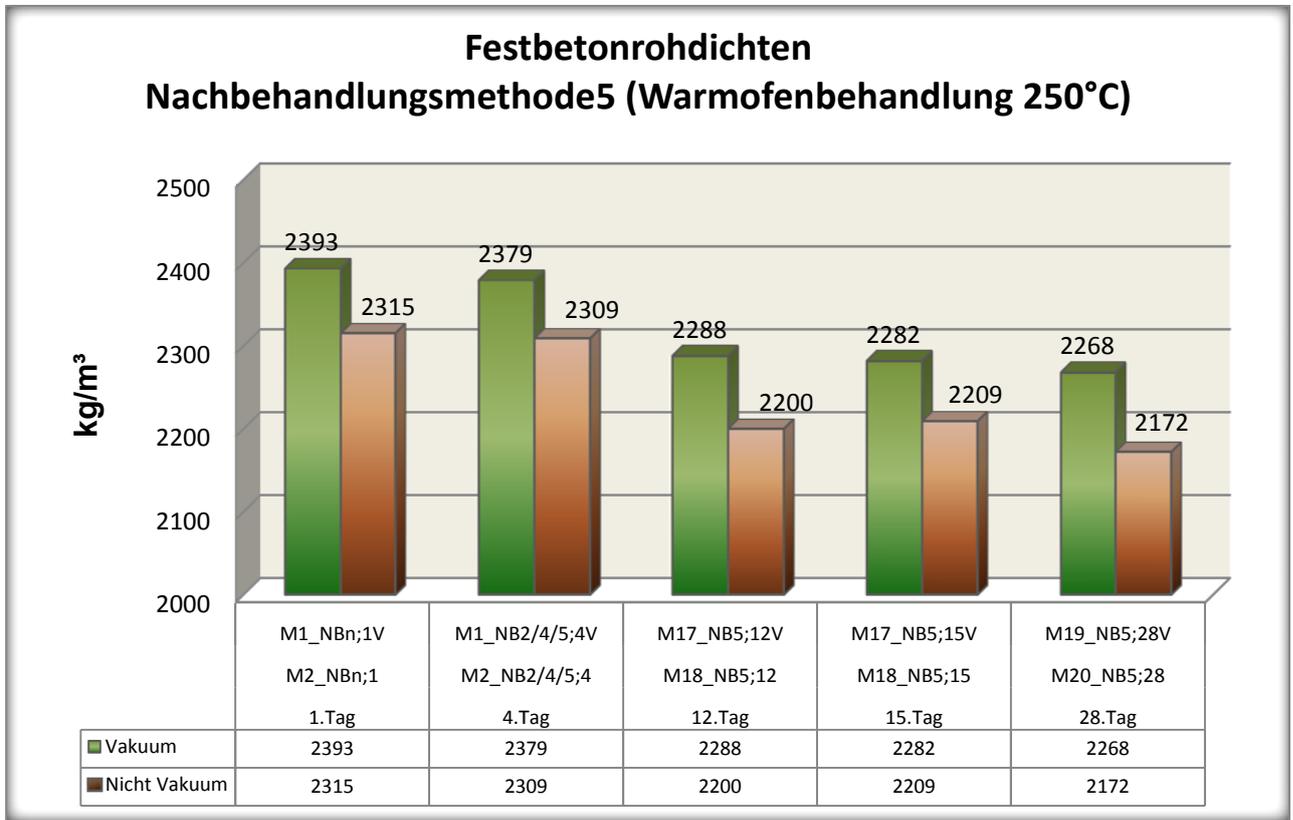


Abbildung 5.8: Festbetonrohndichten Nachbehandlungsmethode 5 nach Tabelle 3.7

In der Abbildung 5.9 sind ähnliche Tendenzen zu erkennen wie schon in den anderen Ergebnissen zuvor. So nimmt die Rohdichte vom 8. auf den 10.Tag leicht zu. In diesem Zeitraum wurden die Proben in dem 90°C Warmwasser gelagert. Vom 10. auf den 12.Tag, während die Proben mit einem 200°C Ofen nachbehandelt wurden, sanken die Rohdichten wieder um 5,4% (Vakuum) beziehungsweise um 5,6% (Nichtvakuum).

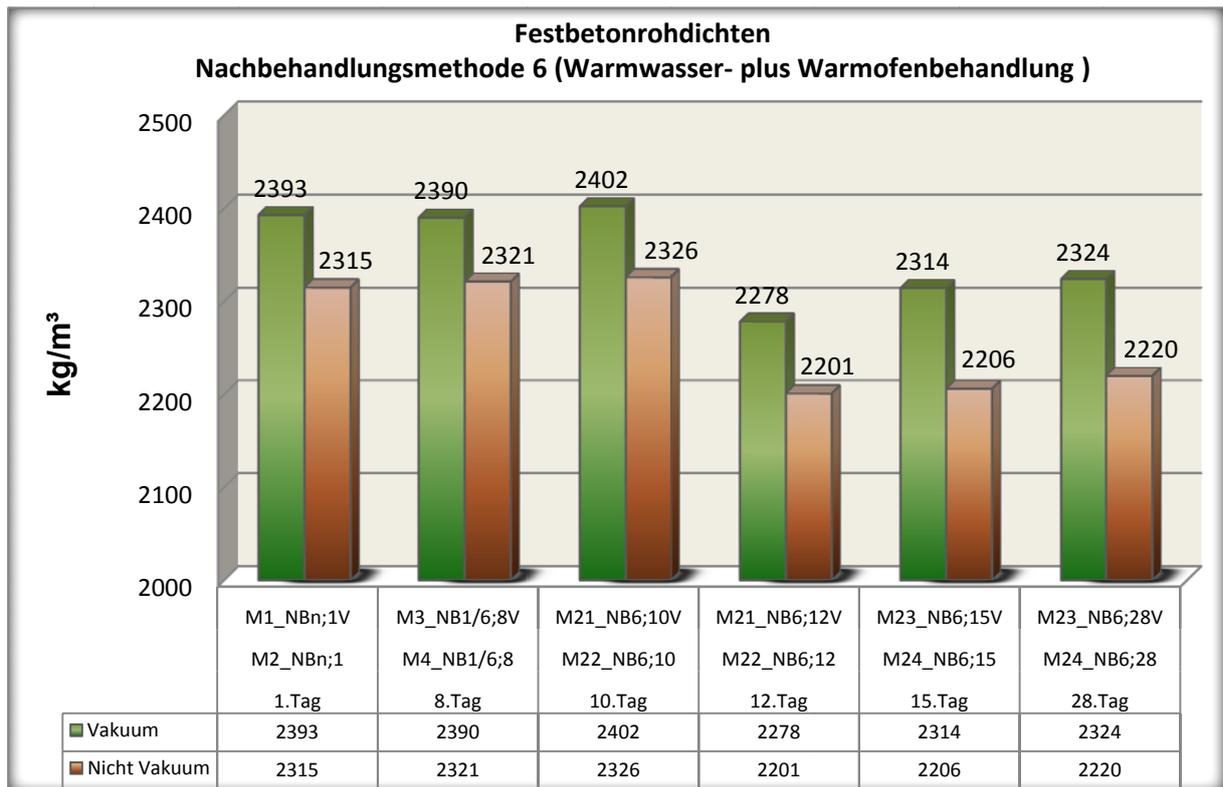


Abbildung 5.9: Festbetonrohddichten Nachbehandlungsmethode 6 nach Tabelle 3.7

5.5.2 Biegezugfestigkeit

Die folgenden Ergebnisse sind wieder die gemittelten Werte der jeweils drei Probepismen einer Probeserie. In den sechs Ergebnisdiagrammen sind die Verläufe der Biegezugfestigkeiten der Probenserien eingetragen. In der Abbildung 5.10 sieht man die Biegezugfestigkeiten der vakuumgemischten und der normalgemischten Proben der Nachbehandlungsmethode 1.

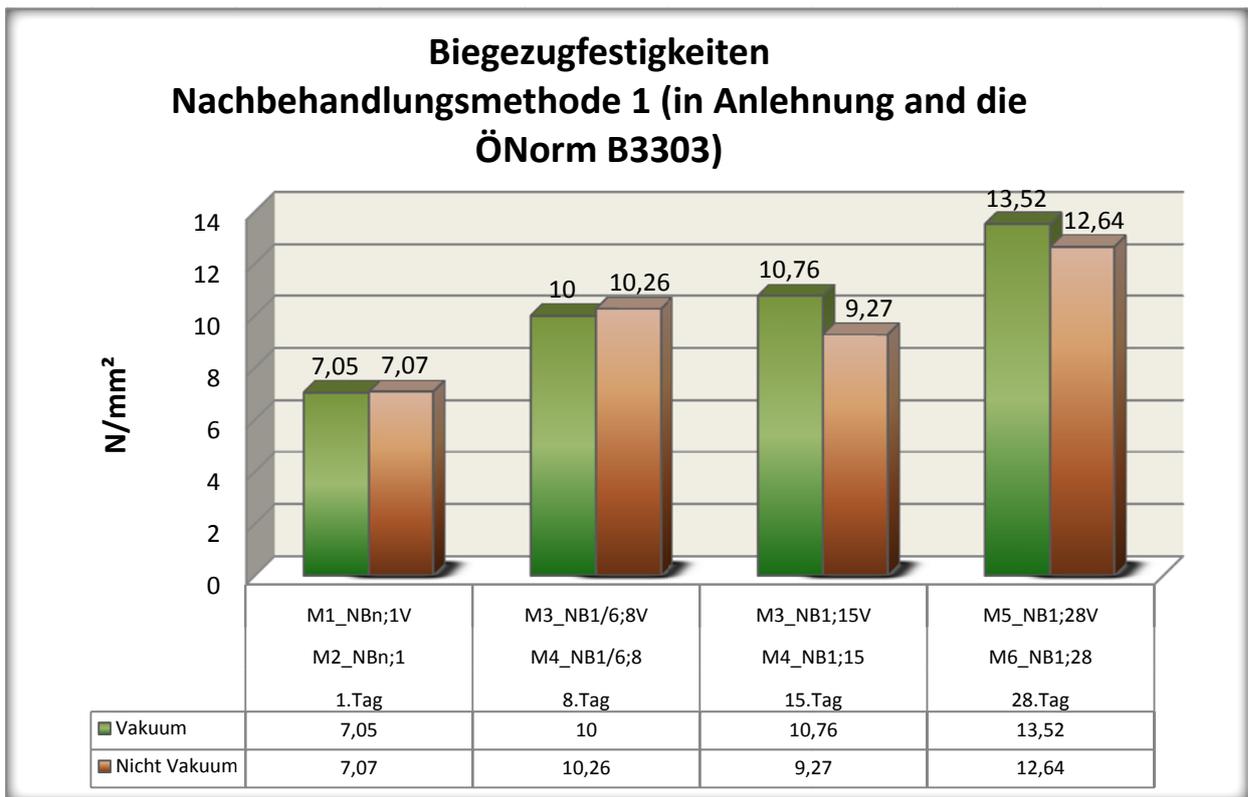


Abbildung 5.10: Biegezugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 1 nach Tabelle 3.7

In der Abbildung 5.11 sind die Biegezugfestigkeiten der vakuumgemischten und der normalgemischten Proben der Nachbehandlungsmethode 2 eingetragen.

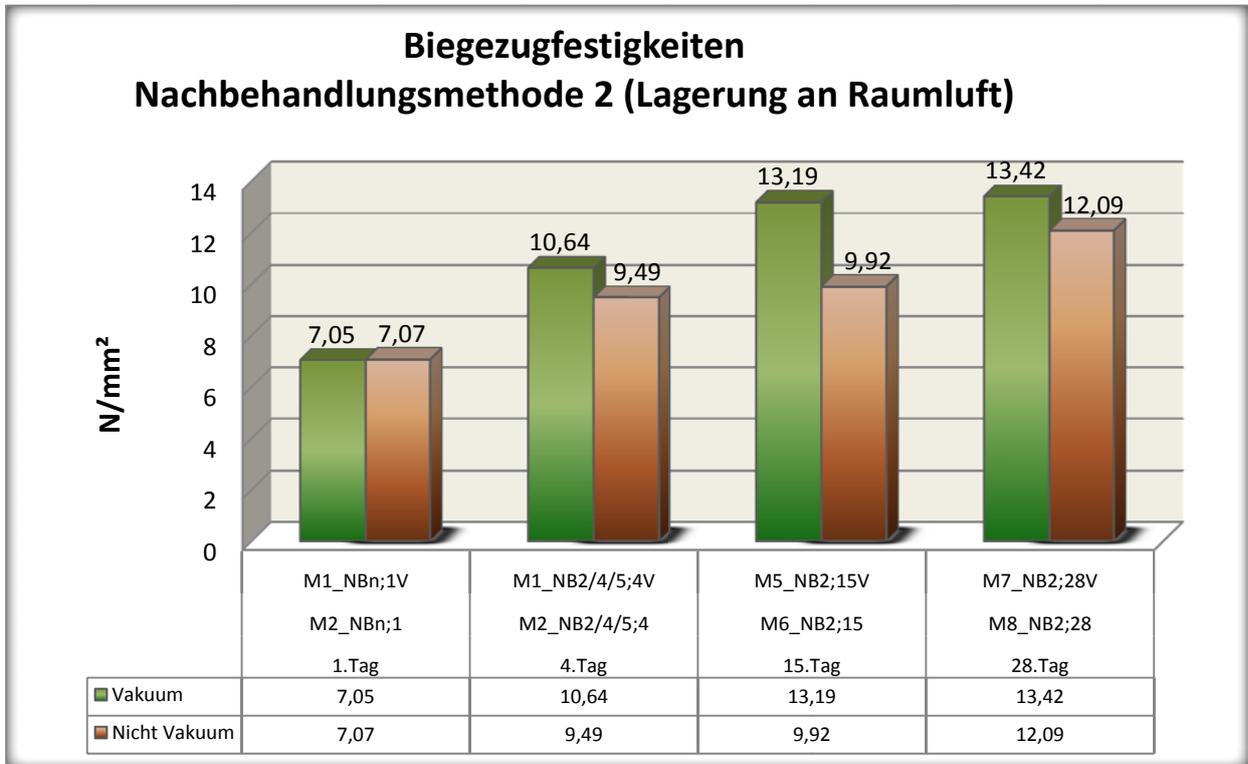


Abbildung 5.11: Biegezugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 2 nach Tabelle 3.7

Zwischen den Ergebnissen der Proben der Nachbehandlung 1 und Nachbehandlung 2 sind keine sehr großen Unterschiede zu erkennen. Es scheint aber so, als ob die Proben die an der Raumlufte lagerten, etwas schneller aushärteten. Nach 28 Tagen kristallisierte sich dann in beiden Diagrammen eine Differenz von ca. 7% (Nachbehandlung 1) und 11% (Nachbehandlung 2) der vakuumbehandelten Proben zu den normalgemischten Prismen heraus. Insgesamt sind die Biegezugfestigkeiten der in Anlehnung an die ÖNORM B3303 nachbehandelten Proben um 0,7% (vakuumgemischt), beziehungsweise um 4,5% (nichtvakuumgemischt) höher als die ohne Nachbehandlung erhärteten Prismen.

In der Abbildung 5.12 sieht man wie die Biegezugfestigkeiten vom 2.Tag auf den 4.Tag, das heißt während der Lagerung in dem Warmwasserbecken, um nahezu 90-100% gestiegen sind, jedoch bis zum 28.Tag wieder um 22,1% beziehungsweise um 31,2% zurückgegangen sind.

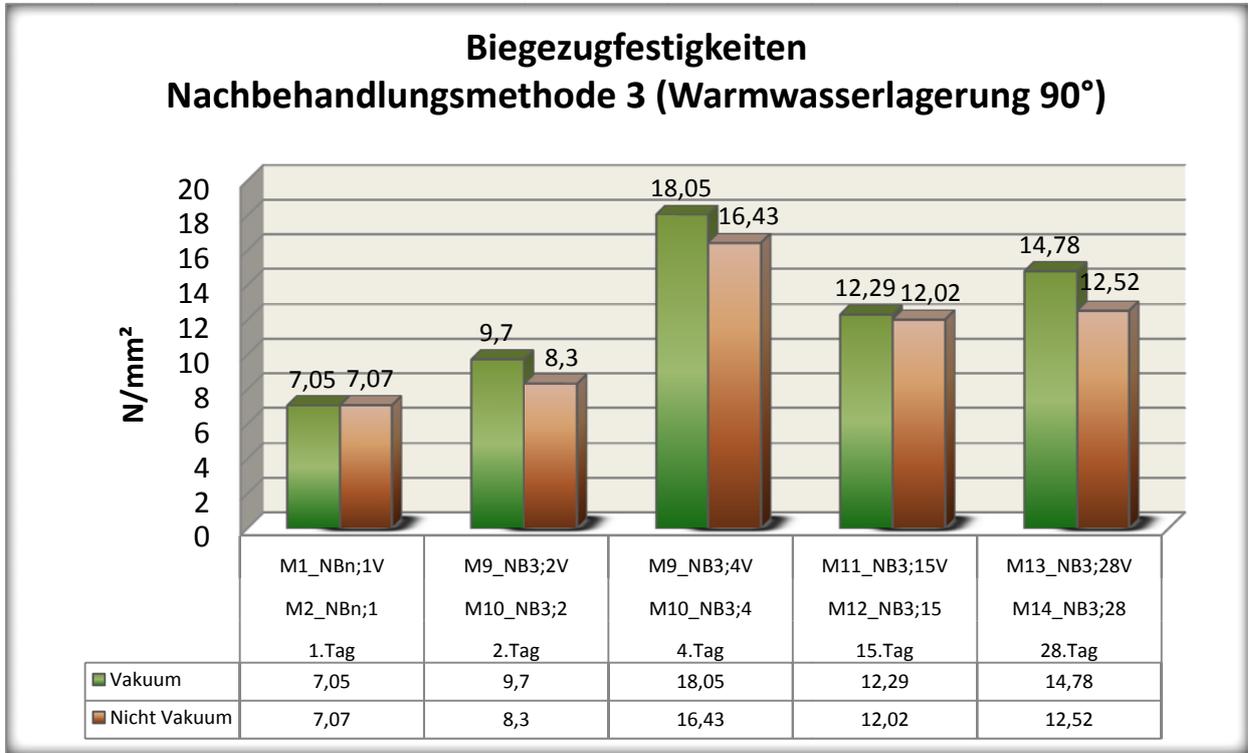


Abbildung 5.12: Biegezugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 3 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.13 sieht man einen stetigen Verlauf der Steigerung der Biegezugfestigkeiten. Jedoch zu erkennen ist, dass die Biegezugfestigkeiten vom 4. bis zum 8.Tag, während die Proben also in einem Ofen bei 90°C gelagert wurden, um 39,2% (Vakuum) beziehungsweise um 46,7%(Nichtvakuum) gestiegen sind.

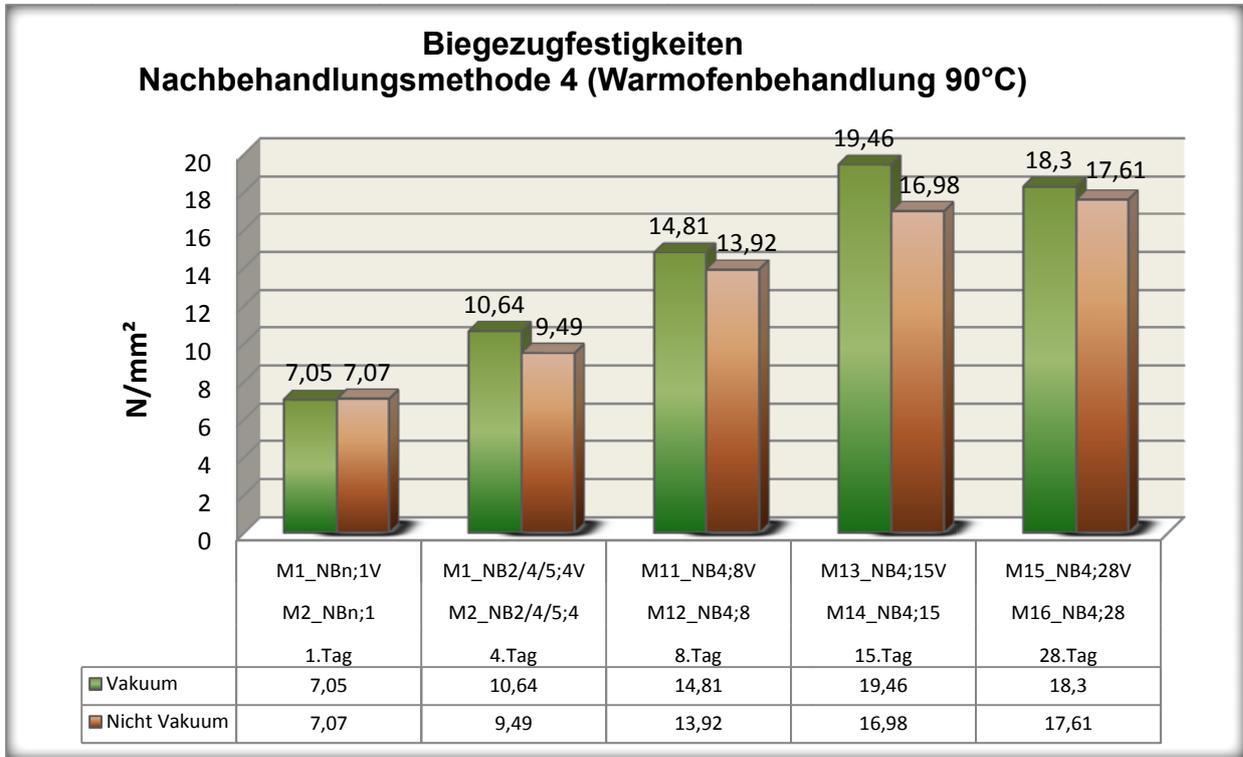


Abbildung 5.13: Biegezugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 4 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.14 kann man einen kontinuierlichen Anstieg der Biegezugfestigkeiten erkennen. Obwohl die Proben vom 4. bis zum 12. Tag in einem Ofen bei 250 °C gelagert waren, sind keine besonderen Sprünge in dem Erhärtungsverlauf zu erkennen.

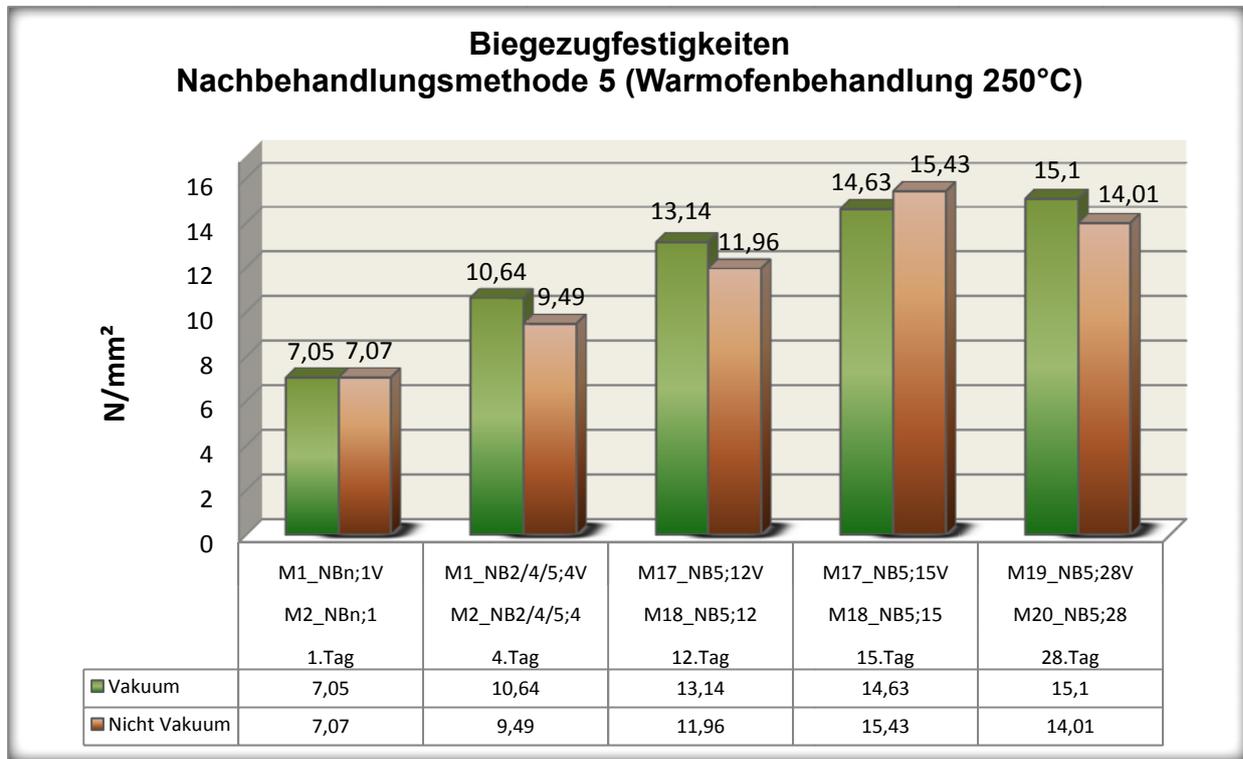


Abbildung 5.14: Biegezugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 5 nach Tabelle 3.7

Der Verlauf der Biegezugfestigkeiten der Proben, die sowohl mit Heißwasser, als auch im Ofen nachbehandelt wurden, ist im Vergleich zu den Verläufen der anderen Ergebnisse sehr unstetig, (siehe Abbildung 5.15). Am 12.Tag, an diesem Tag werden die Proben aus dem Ofen genommen, sind sowohl beim vakuumgemischten, als auch beim Nichtvakuumgemischten Beton, nur sehr enttäuschende Ergebnisse zustande gekommen. Jedoch scheint es als hätten die Proben innerhalb von 3 Tagen ihre Biegezugfestigkeiten um 73,9% (Vakuum) und um 140% (Nichtvakuum) steigern können. Außerdem ist es interessant, dass hier die Biegezugfestigkeit der nichtvakuumgemischten Proben am 15.Tag und am 28.Tag höher waren als die vakuumgemischten Proben, wo doch sonst ausnahmslos die vakuumgemischten Proben bei jeder Prüfung besser abschnitten.

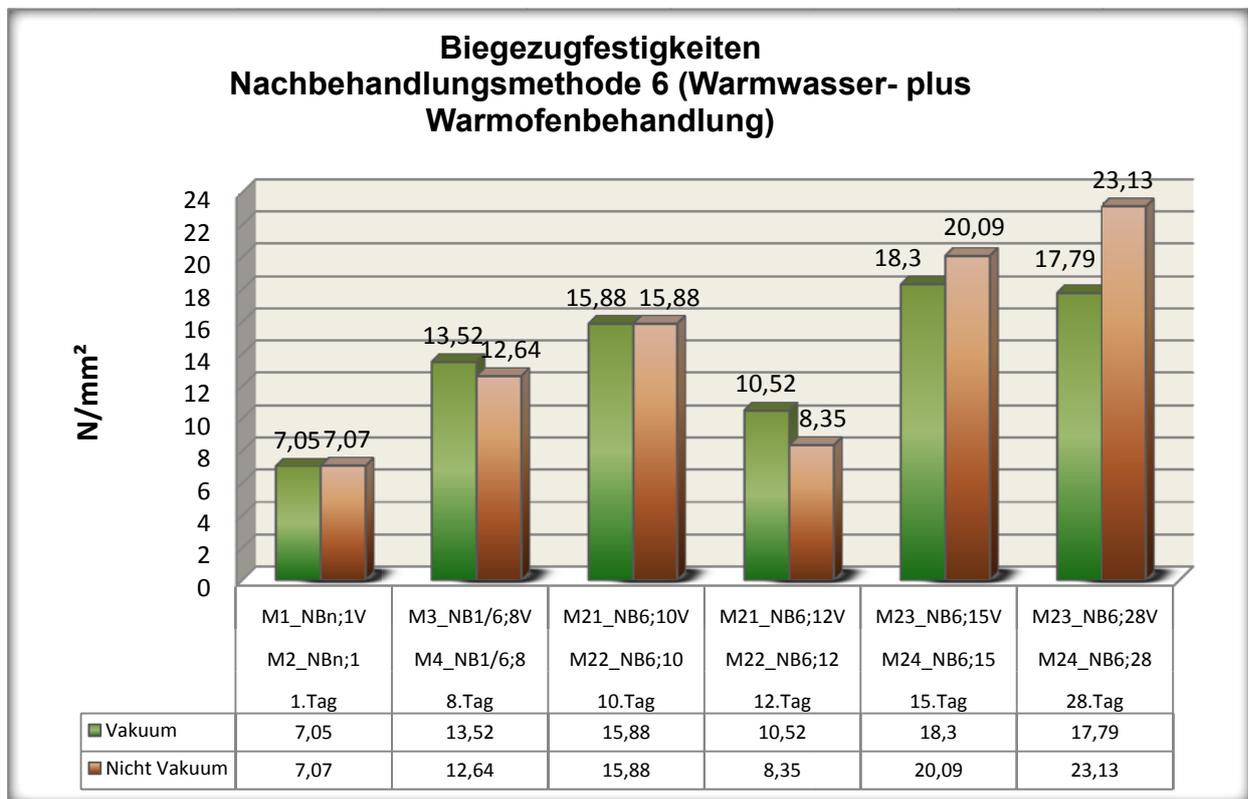


Abbildung 5.15: Biegezugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 6 nach Tabelle 3.7

5.5.3 Spaltzugfestigkeit

Die folgenden Ergebnisse sind wieder die gemittelten Werte der jeweils 3 Probepismen einer Probeserie. In den 6 Ergebnisdiagrammen sind die Verläufe der Spaltzugfestigkeiten der Probenserien mit den unterschiedlichen Nachbehandlungen eingetragen.

In Abbildung 5.16 sieht man, dass die Spaltzugfestigkeit vom 15.Tag auf den 28.Tag wieder leicht um 10,3% (Vakuum) und 1% (Nichtvakuum) abgenommen hat. Am 28.Tag liegt die Spaltzugfestigkeit des vakuumgemischten Betons um 30,4% höher als die des normalgemischten Betons.

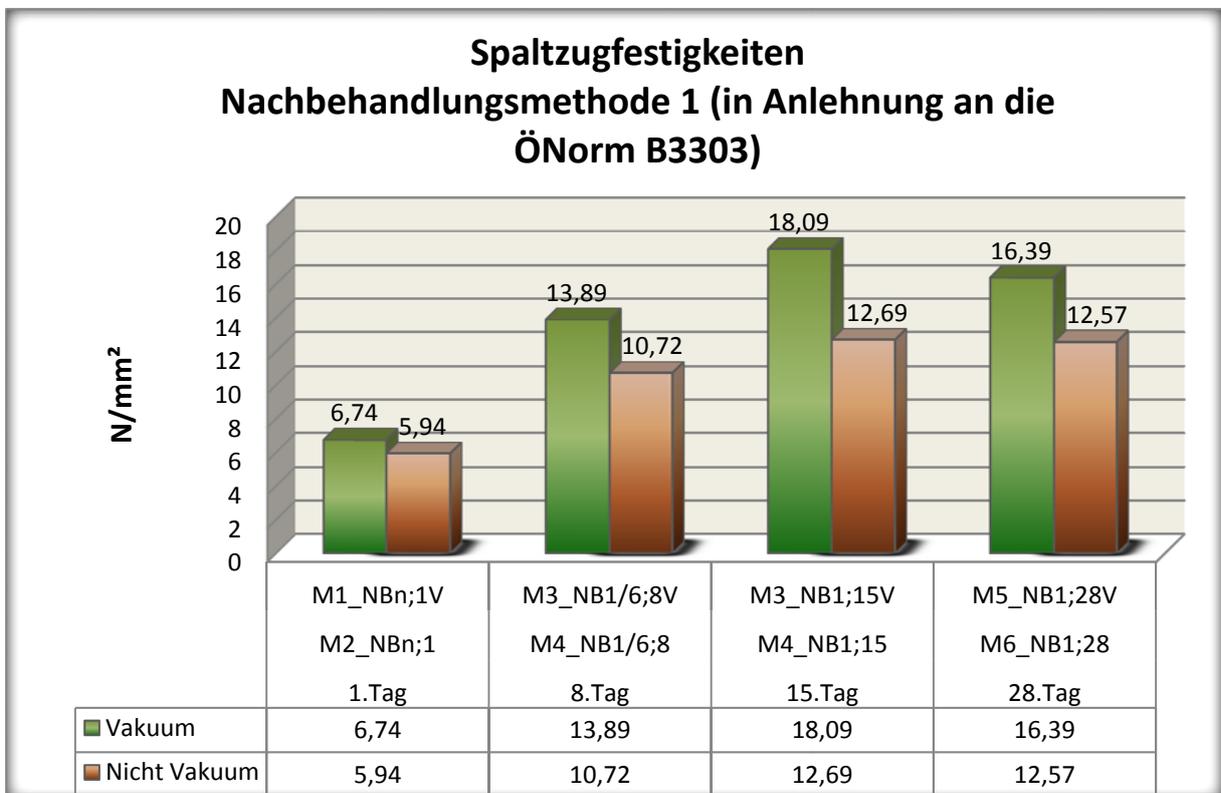


Abbildung 5.16: Spaltzugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 1 nach Tabelle 3.7

Abbildung 5.17 zeigt eine kontinuierliche Steigerung der Spaltzugfestigkeit bis zum 28.Tag. Hier übersteigen die Ergebnisse der 28-Tagefestigkeiten der vakuumgemischten die der nichtvakuumgemischten Proben um 20,3%.

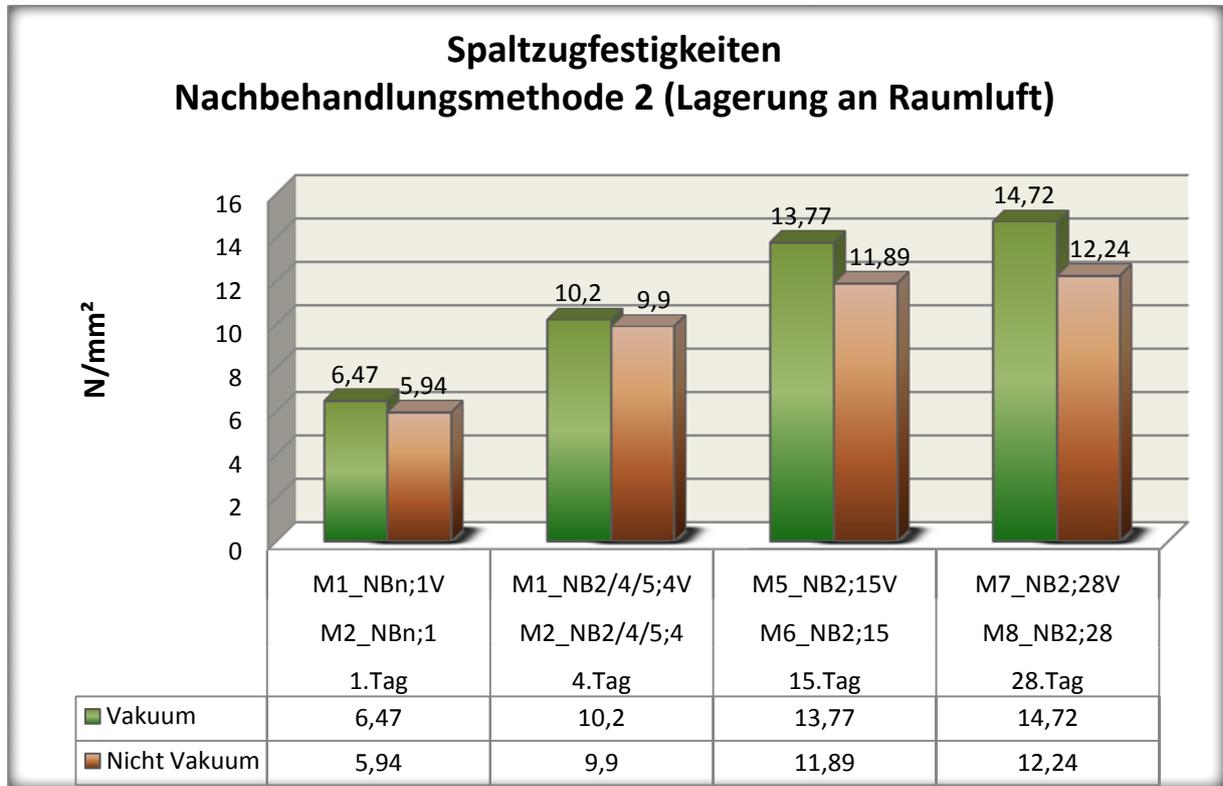


Abbildung 5.17: Spaltzugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 2 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.18 sieht man einen sprunghaften Anstieg der Spaltzugfestigkeiten vom 2. auf den 4.Tag, während die Proben in dem Warmwasserbecken bei 90°C gelagert waren. So stieg die Spaltzugfestigkeit innerhalb von 2 Tagen um 84,7% (Vakuum) und um 67,8% (Nicht Vakuum). Erwähnenswert ist, dass sich am 28.Tag keine so große Differenz (nur 6%) zwischen den Ergebnissen der vakuumgemischten und der nichtvakuumgemischten Proben abgezeichnet hat, wie in den Ergebnissen der übrigen Nachbehandlungsmethoden.

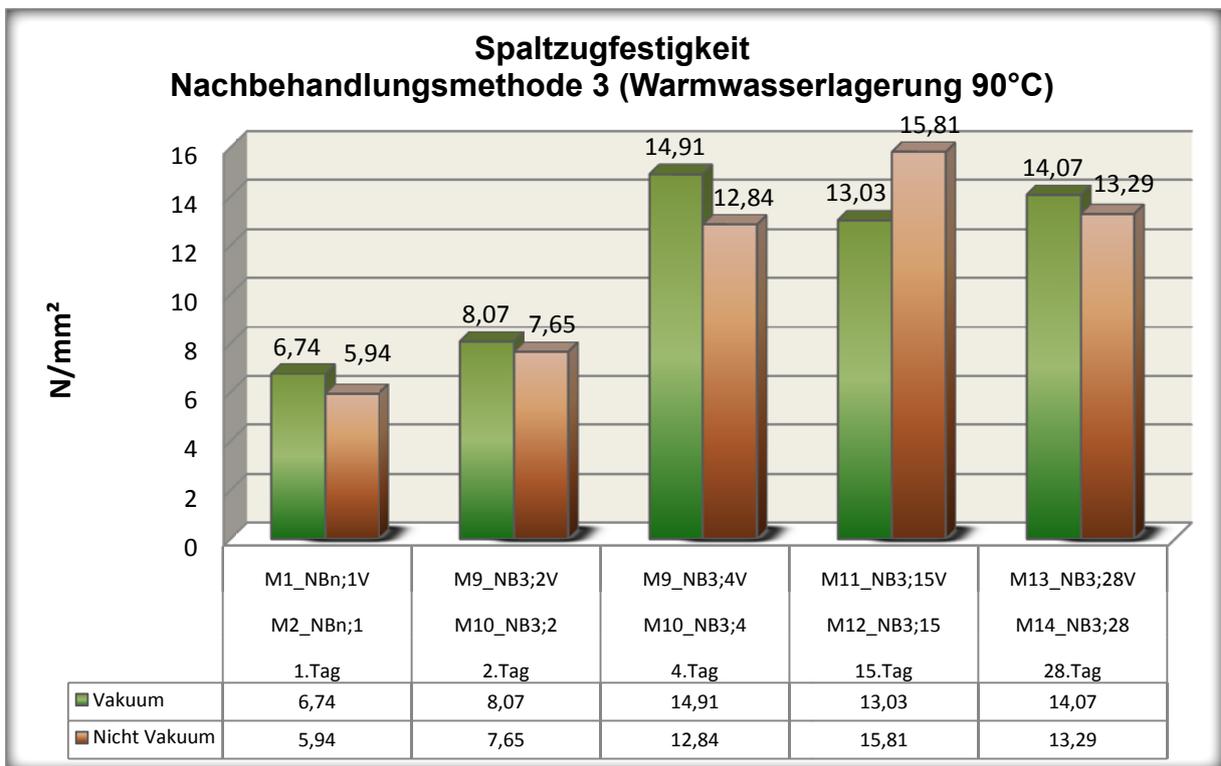


Abbildung 5.18: Spaltzugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 3 nach Tabelle 3.7

Abbildung 5.19 zeigt die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsversuche der Proben der Nachbehandlung 4.

Hier erkennt man, dass die Spaltzugfestigkeiten während des Aufenthalts der Proben in dem 90 °C temperierten Ofen in 4 Tagen um 69% (Vakuum) beziehungsweise um 38,38% (Nichtvakuum) gestiegen sind. Am 28.Tag sind die Ergebnisse der vakuumgemischten im Vergleich zu den nichtvakuumgemischten Proben wieder klar höher (um 35,9%).

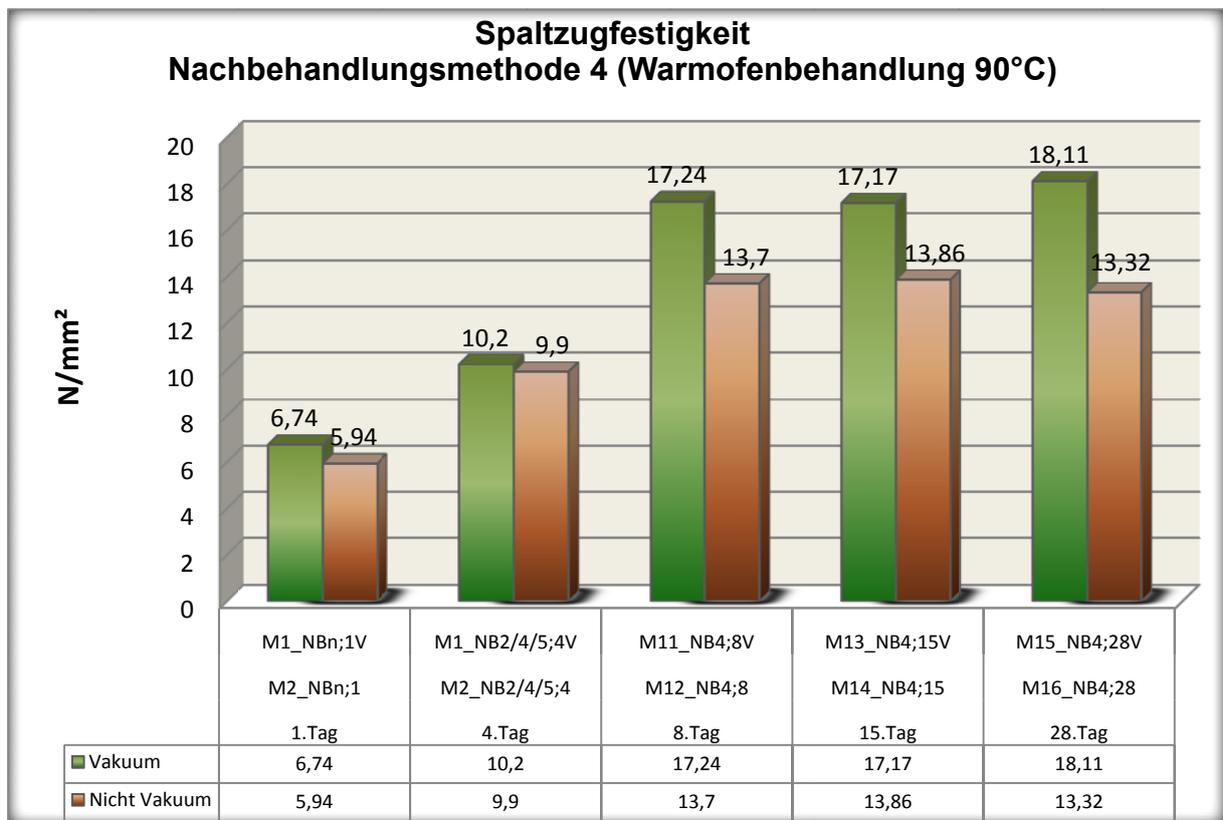


Abbildung 5.19: Spaltzugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 4 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.20 sind die Spaltzugfestigkeiten der Prismen der Nachbehandlung 5 dargestellt.

Während der Lagerung für 7 Tage in dem 250°C temperierten Ofen erhöhte sich die Spaltzugfestigkeit der Prismen um 71,9% (Vakuum) beziehungsweise um 49,8% (Nichtvakuum). Vom 12. bis zum 28.Tag sank die Spaltzugfestigkeit wieder etwas, und zwar um 9,3% (Vakuum) beziehungsweise um 1,5% (Nichtvakuum). Am 28.Tag erzielten die vakuumgemischten gegenüber den nichtvakuumgemischten Proben eine um 13,0% höhere Spaltzugfestigkeit.

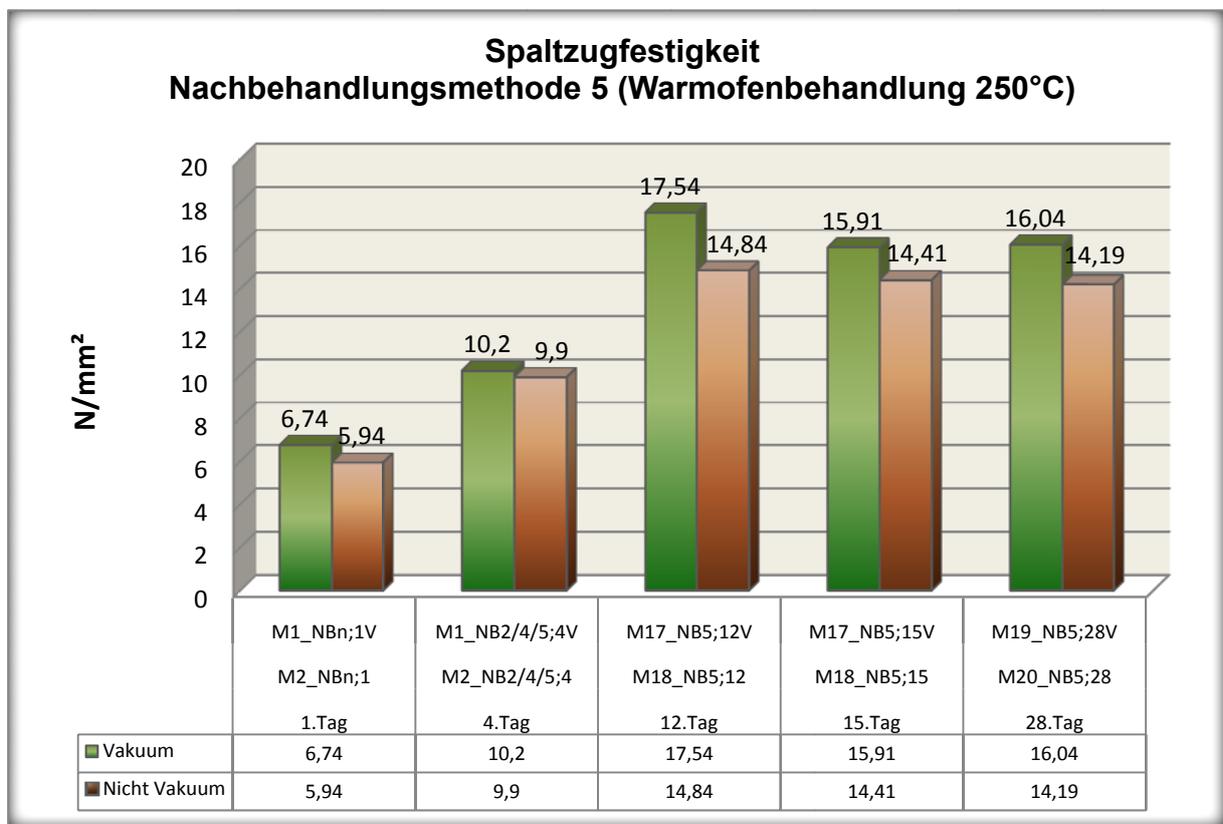


Abbildung 5.20: Spaltzugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 5 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.21 sieht man, dass die Entwicklung der Spaltzugfestigkeit der nichtvakuumgemischten Proben kontinuierlicher verläuft wie die der vakuumgemischten Probekörper. So sank die Spaltzugfestigkeit der vakuumgemischten Proben vom 8. bis zum 12. Tag, während diese zuerst 48 h in dem Warmwasserbecken bei 90°C und dann 48 h in einem 200°C Ofen verbrachten, um 7,5%. Im Vergleich dazu stieg die Spaltzugfestigkeit der nichtvakuumgemischten Proben im selben Zeitraum um 57,1%. Am 28.Tag sind die Ergebnisse der vakuumgemischten Proben um 7,6% höher als die der normalgemischten Proben.

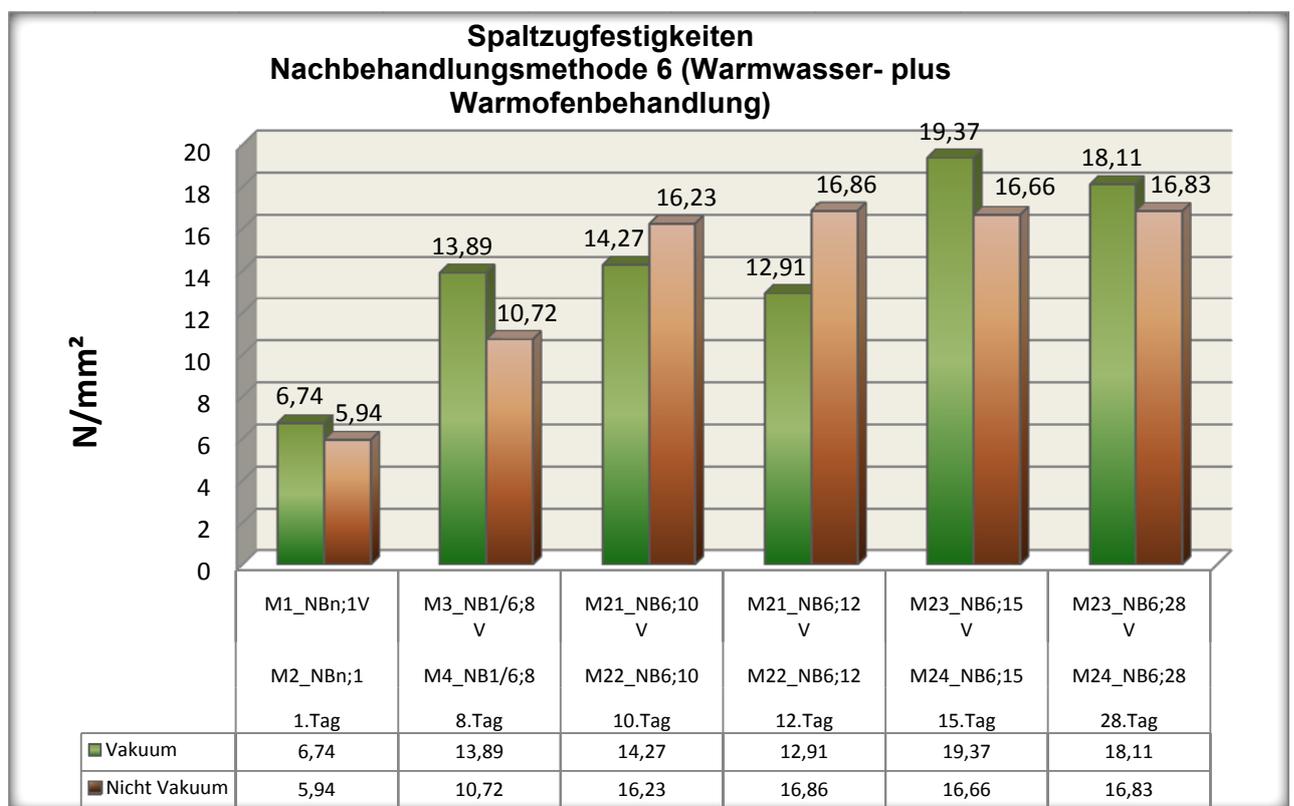


Abbildung 5.21: Spaltzugfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 6 nach Tabelle 3.7

5.5.4 Druckfestigkeit

Die folgenden Ergebnisse sind wieder die gemittelten Werte der jeweils 3 Probepismen einer Probeserie. In den 6 Ergebnisdiagrammen sind die Verläufe der Druckfestigkeiten der Probenserien eingetragen.

In Abbildung 5.22 sieht man, dass die Druckfestigkeit vom 15.Tag auf den 28.Tag einerseits wieder leicht um 4,3% fällt (Vakuum) und andererseits um 10,2% steigt (Nichtvakuum). Am 28.Tag liegt die Druckfestigkeit des vakuumgemischten Betons um 4,66% höher als die des normalgemischten Betons.

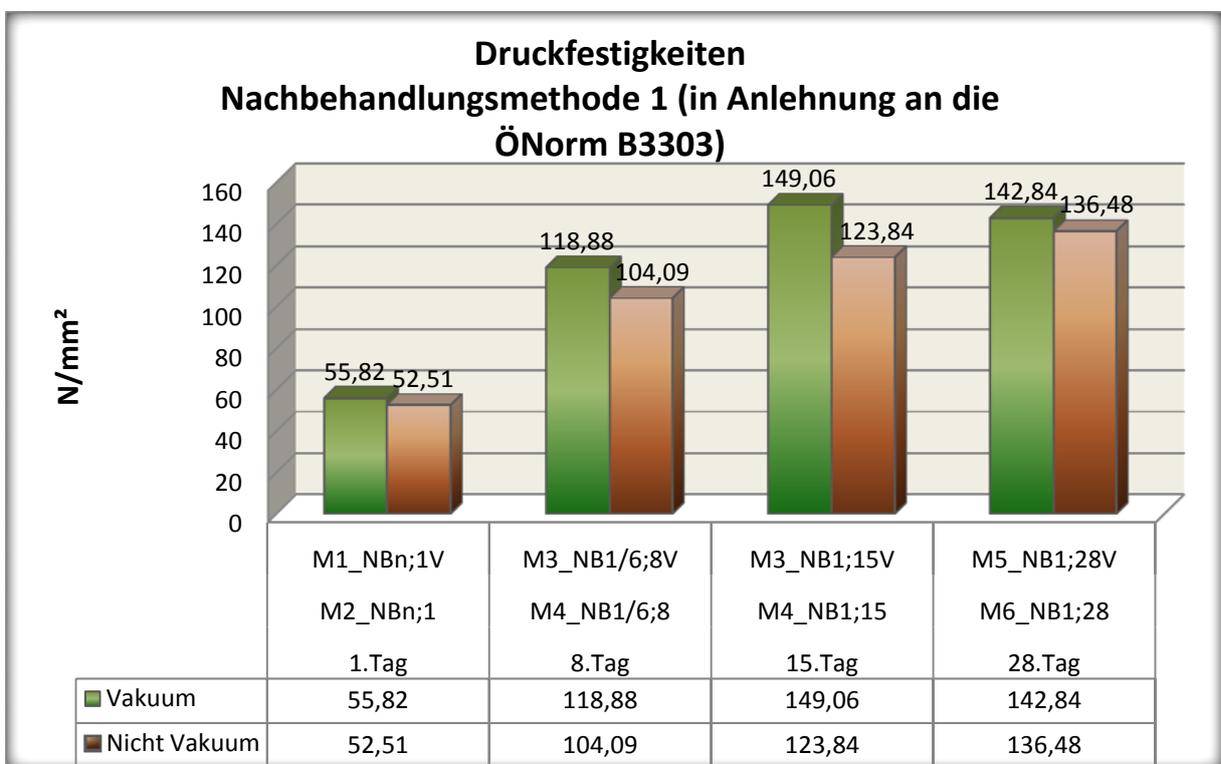


Abbildung 5.22: Druckfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 1 nach Tabelle 3.7

Abbildung 5.23 zeigt eine kontinuierliche Steigerung der Druckfestigkeiten bis zum 28.Tag. Hier übersteigen die Ergebnisse der vakuumgemischten die der nichtvakuumgemischten Proben um 17,5%.

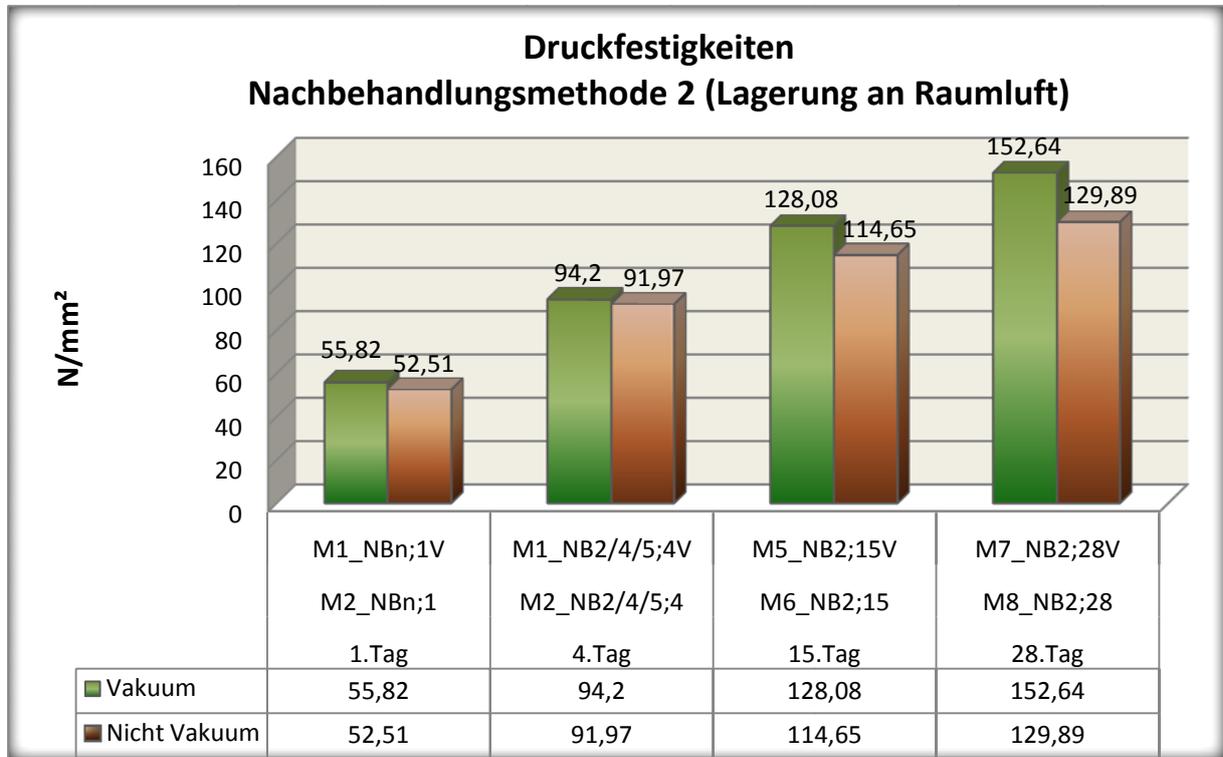


Abbildung 5.23: Druckfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 2 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.24 sieht man einen sprunghaften Anstieg der Druckfestigkeiten vom 2. auf den 4.Tag, während die Proben in dem Warmwasserbecken bei 90°C gelagert waren. So stieg die Druckfestigkeit innerhalb von 2 Tagen um 85,6% (Vakuum) und um 134,1% (Nicht Vakuum). Am 28.Tag übersteigen die Ergebnisse der vakuumgemischten die der nichtvakuumgemischten Proben um knapp 7,0%.

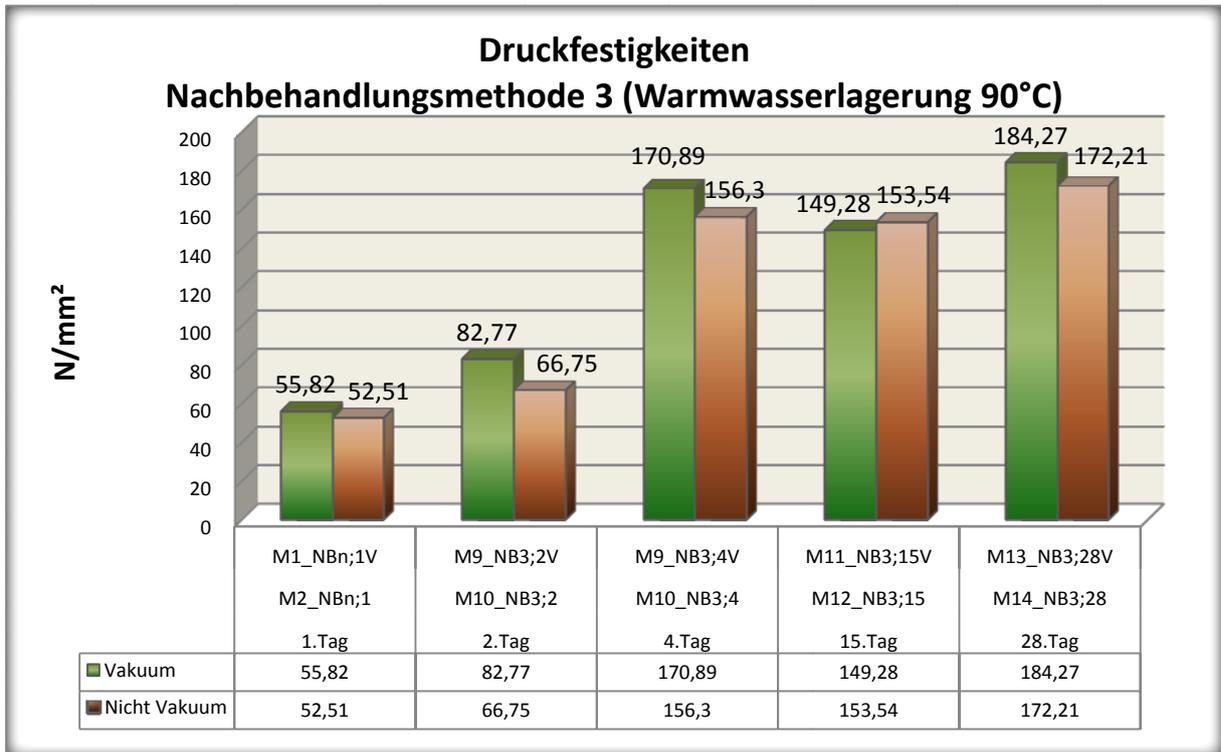


Abbildung 5.24: Druckfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 3 nach Tabelle 3.7

Abbildung 5.25 zeigt die Druckfestigkeiten der Proben der Nachbehandlung 5. Hier erkennt man, dass die Druckfestigkeiten während des Aufenthalts der Proben in dem 90 °C temperierten Ofen in 4 Tagen um 82,1% (Vakuum) beziehungsweise um 42,3% (Nichtvakuum) gestiegen sind. Am 28.Tag sind die Ergebnisse der vakuumgemischten im Vergleich zu den nichtvakuumgemischten Proben wieder klar um 21,2% höher.

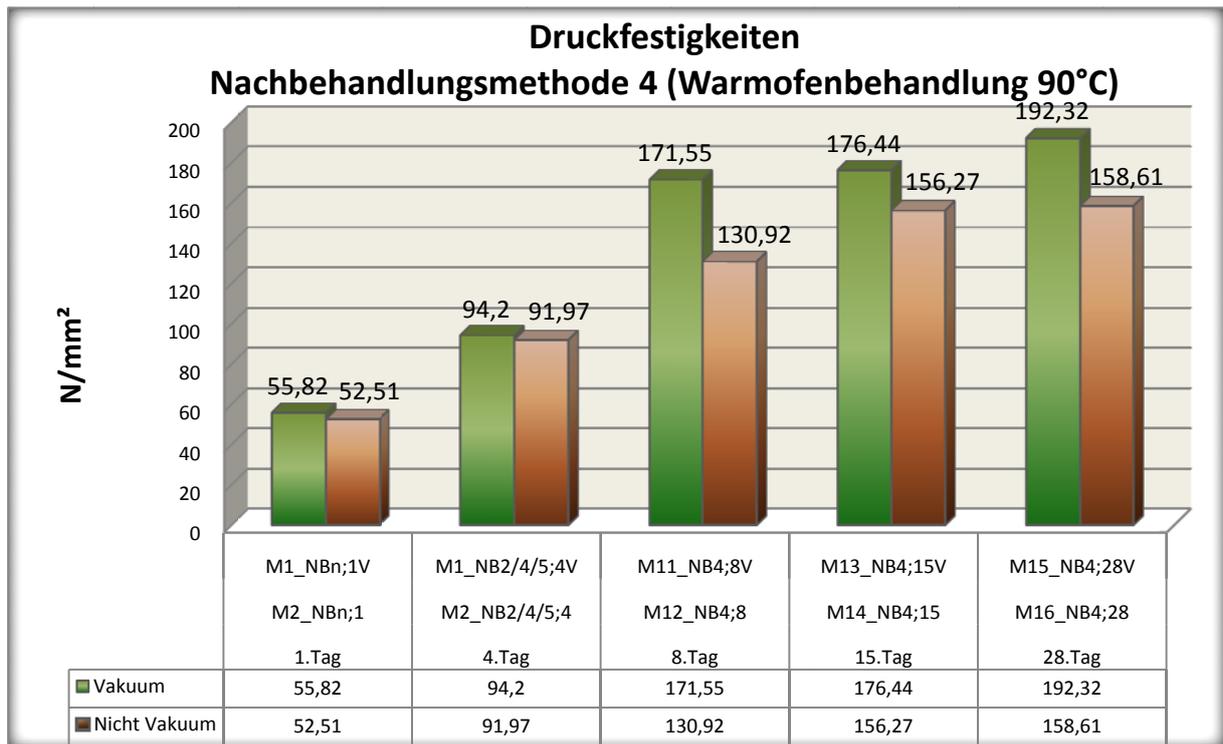


Abbildung 5.25: Druckfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 4 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.26 sieht man, dass sich die Druckfestigkeit der Prismen, während Lagerung für 7 Tage in dem 250°C temperierten Ofen, um 157,8% (Vakuum) beziehungsweise um 98,3% (Nichtvakuum) erhöhten. Vom 12. Bis zum 28.Tag sank die Druckfestigkeit wieder um 16,2% (Vakuum) beziehungsweise stieg sie um 2,9% (Nichtvakuum). Am 28.Tag erzielen die vakuumgemischten gegenüber den nichtvakuumgemischten Proben eine um 11,2% höhere Druckfestigkeit.

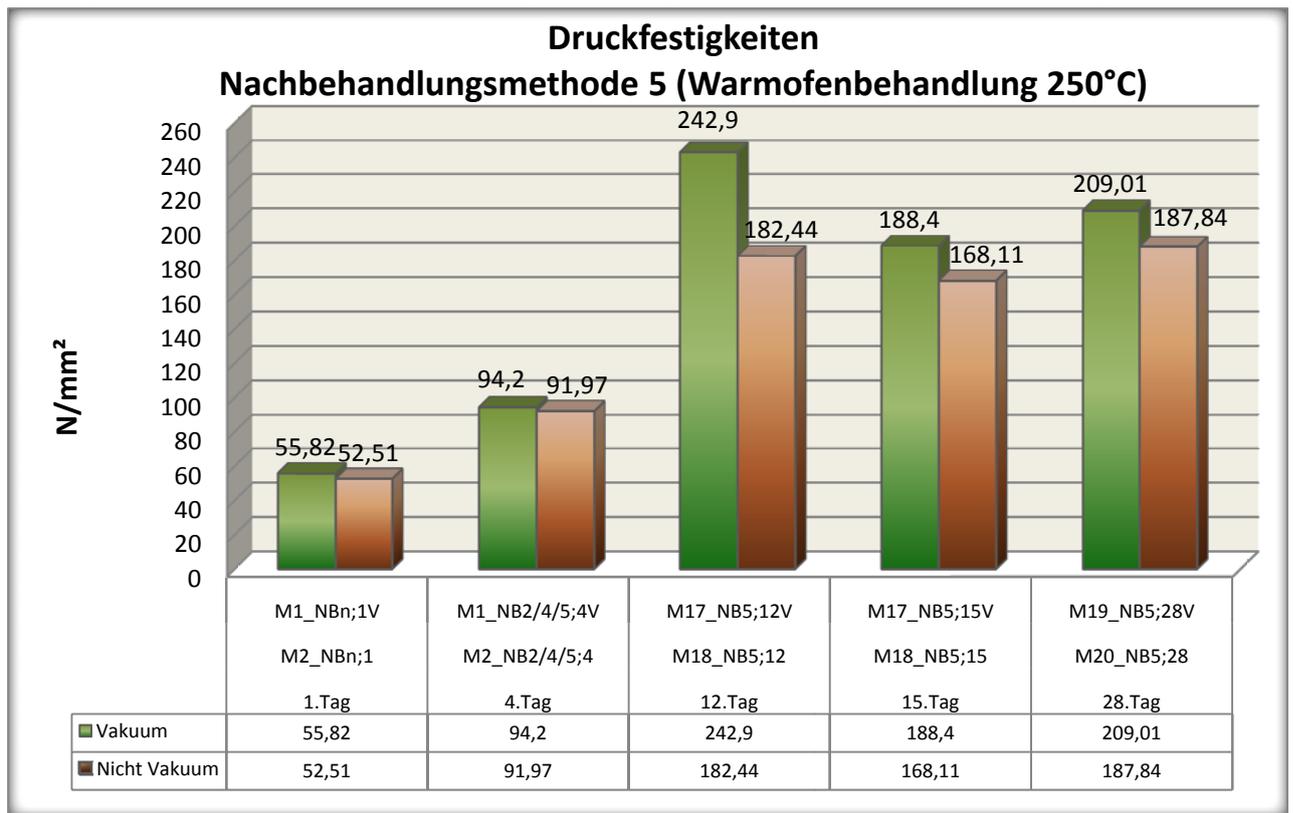


Abbildung 5.26: Druckfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 5 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.27 sieht man, dass die Druckfestigkeiten vom 8.Tag auf den 10.Tag (Die Proben lagen hier im 90°C Wasserbecken) um 41,6% (Vakuum) bzw. um 48,2% (Nichtvakuum) und vom 10. auf den 12.Tag (Während die Proben bei 200°C gelagert wurden) um 36,2% (Vakuum) beziehungsweise um 45,6% (Nichtvakuum) stiegen. Am 28.Tag sind die Ergebnisse der vakuumgemischten Proben um 25,7% höher als die der normalgemischten Proben.

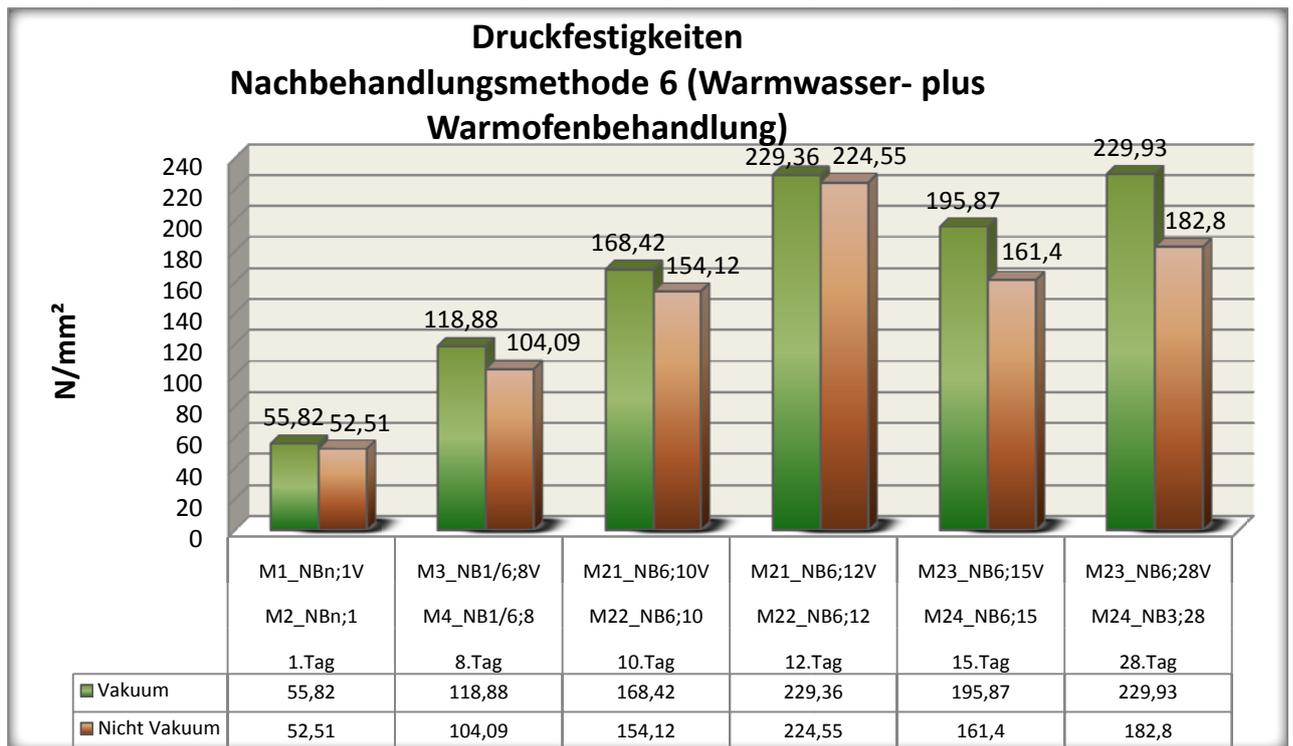


Abbildung 5.27: Druckfestigkeiten, Nachbehandlungsmethode 6 nach Tabelle 3.7

5.5.5 Porosität

5.5.5.1 Porenvolumenverteilung

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Porenvolumenverteilungen der Proben jeder Nachbehandlungsmethode mithilfe einer Summenlinie in Abhängigkeit von den Porenradien dargestellt. Durch das Addieren der Volumina der Poren mit unterschiedlichen Porendurchmessern kommt man auf die Summenlinie des kumulativen Volumens. Die Porenradien werden auf der Abszisse logarithmisch in Mikrometer [μm], das entspricht 10^{-6}m , aufgetragen. In der Ordinate wird das kumulative Volumen in [mm^3/g] linear aufgetragen.

In den Abbildungen kann man erkennen, dass die Summenlinien im Porendurchmesserbereich zwischen 0,001 und 0,01 Mikrometer besonders steil

abfällt und dann wesentlich flacher fortsetzt. Das bedeutet, dass es in der untersuchten Probe besonders viele Poren im Bereich von $0,001$ - $0,01\mu\text{m}$ gibt.

In der Abbildung 5.28 sieht man, dass die vakuumgemischten Proben, im direkten Vergleich mit den normalgemischten Proben, mehr Poren mit geringerem Porendurchmesser haben. Unabhängig davon, ob die Proben vakuumgemischt wurden oder nicht, sieht man, dass kaum Poren $\geq 0,1\mu\text{m}$ vorhanden sind. Der Großteil der Poren hat einen Durchmesser von $0,002$ bis $0,011\mu\text{m}$.

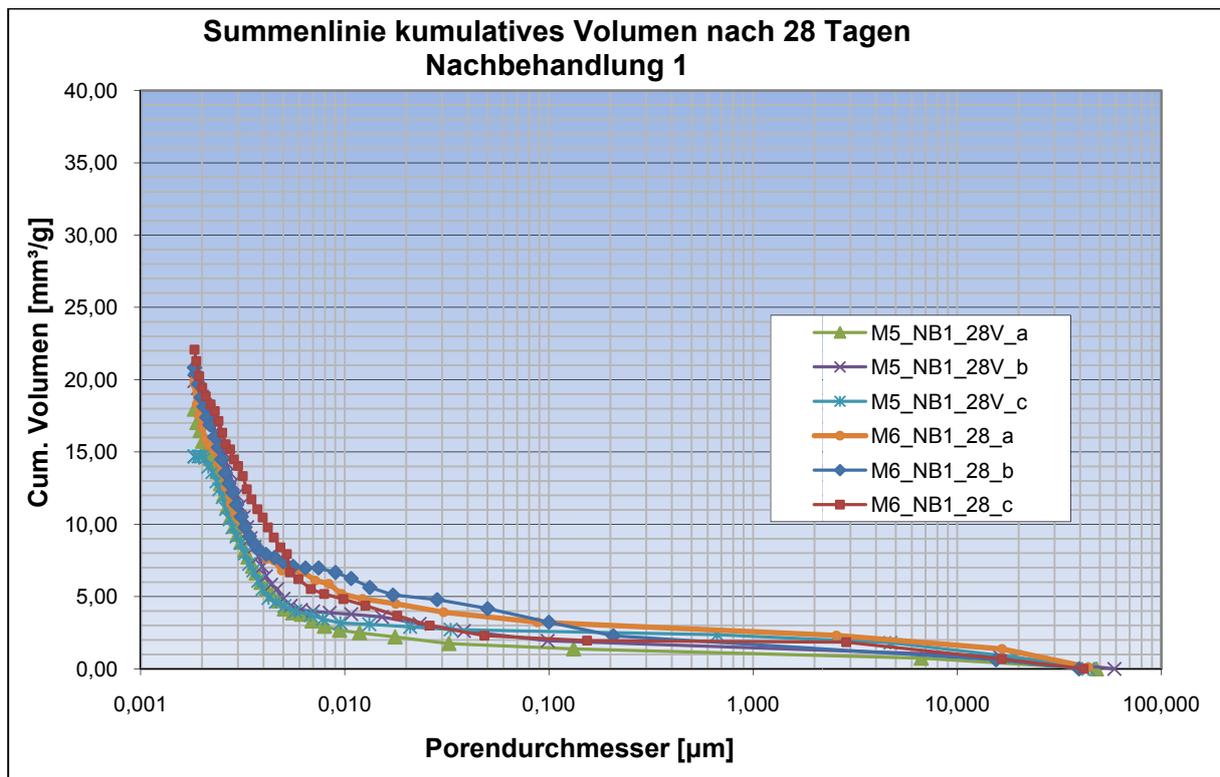


Abbildung 5.28: Summenlinie kumulatives Porenvolumen, 28.Tag; Nachbehandlung 1 (In Anlehnung an die ÖNORM B 3303) nach Tabelle 3.7

Abbildung 5.29 zeigt noch deutlichere Differenzen zwischen den Summenlinien der kumulativen Volumina der vakuumgemischten und normalgemischter Proben. Es scheint als ob der aufgebrachte Unterdruck von 60 mbar während des Mischens, Poren die größer als $0,01\mu\text{m}$ sind, weitgehend aus der Struktur entfernt hat. Es sind hier hauptsächlich Poren von $0,002$ bis $0,013\mu\text{m}$ zu finden.

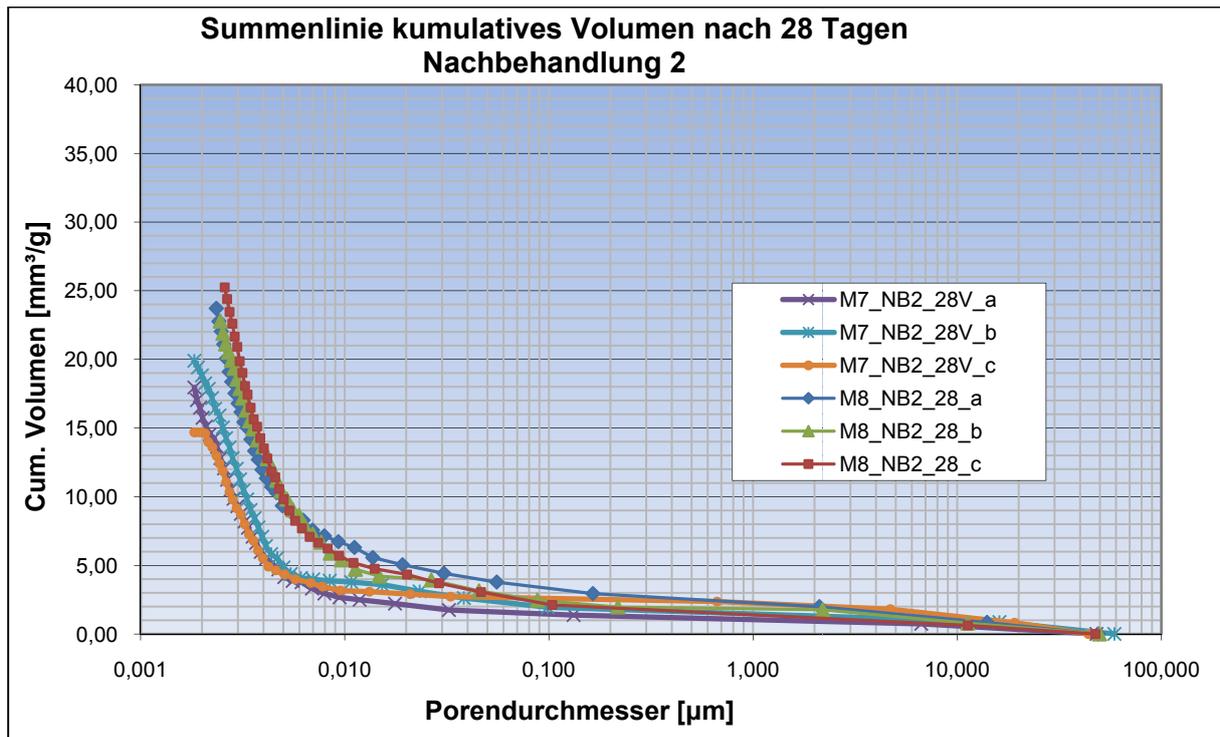


Abbildung 5.29: Summenlinie kumulatives Porenvolumen, 28.Tag; Nachbehandlung 2 (Lagerung an Raumluft) nach Tabelle 3.7

Abbildung 5.30 zeigt das kumulative Volumen der Proben der Nachbehandlung 3. Man kann klar erkennen, dass es in der Struktur des vakuumgemischten Betons hauptsächlich Poren von 0,002 bis 0,004 μm gibt. Die Ausnahme hierbei bildet die normalgemischte Probe M14_NB3_28_a, die wesentlich größere Poren aufweist. Im Vergleich zu den Porenvolumenverteilungen der Nachbehandlung 1 und der Nachbehandlung 2 sind die Kurven der vakuumgemischten Proben im Bereich zwischen 0,002 und 0,003 μm besonders steil. Offensichtlich konnte die Warmwasserbehandlung bei 90°C die Entstehung größerer Poren im Beton verhindern. Außerdem sieht man wieder ganz klar, dass der normalgemischte Beton vermehrt Poren mit größerem Durchmesser in seinem Gefüge aufweist.

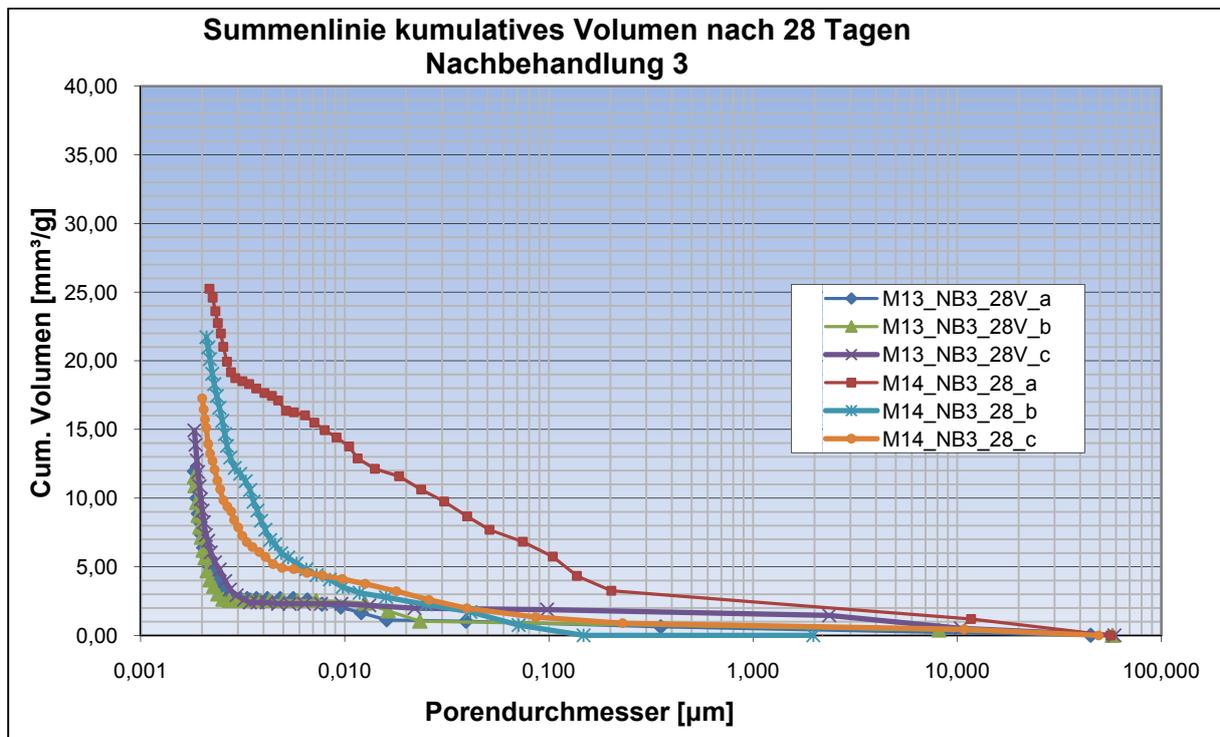


Abbildung 5.30: Summenlinie kumulatives Porenvolumen, 28.Tag; Nachbehandlung 3 (Warmwasserlagerung, 90°C) nach Tabelle 3.7

Abbildung 5.31 zeigt die Porenvolumenverteilungen der Proben der Nachbehandlung 4. Hier sind ebenfalls wieder die größeren Poren bei den normalgemischten Proben zu finden. Die Summenlinien der Nachbehandlung 4 (Warmofenbehandlung, 90°C) zeigen im Großen und Ganzen starke Ähnlichkeiten zu denen der Nachbehandlung 3 (Warmwasserlagerung, 90°C). So sind kaum Poren mit Durchmessern $\geq 0,004 \mu\text{m}$ in der Struktur des vakuumgemischten Betons zu finden. Im normalgemischten Beton machen den Löwenanteil die Poren mit Durchmesser von 0,002 bis 0,008 μm aus.

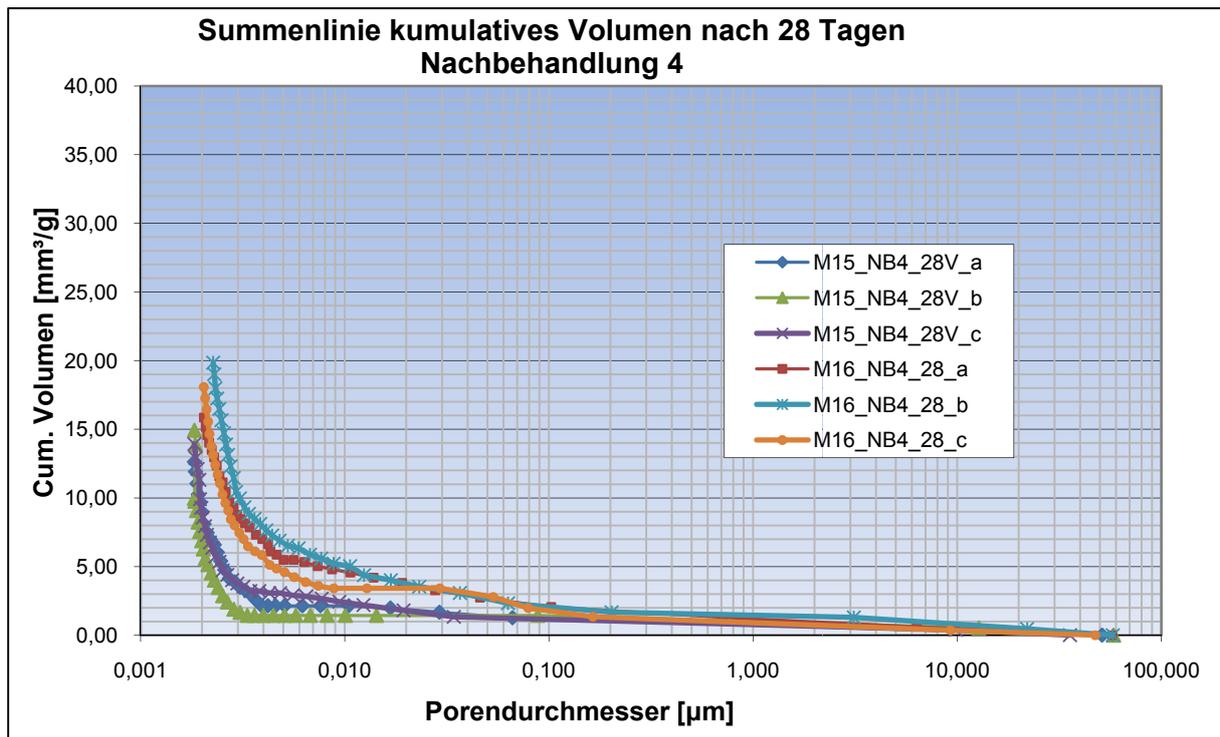


Abbildung 5.31: Summenlinie kumulatives Volumen, 28.Tag; Nachbehandlung 4 (Warmofenbehandlung, 90°C) nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.32 sind die Porenvolumenverteilungen der Proben der Nachbehandlung 5 (Warmofenbehandlung, 250°C) dargestellt.

Im Vergleich zu den Summenlinien der Proben der Nachbehandlungsmethoden 3 und 4 sind hier die hauptsächlich vorkommenden Poren um bis zu 10-mal größer. Die Porengrößen reichen hier von 0,009 bis 0,2 µm. Wie auch bei den anderen Ergebnissen weisen die Summenlinien der normalgemischten Proben im Durchschnitt größere Porendurchmesser auf. Offensichtlich wurde die Bildung von grobkörnigen Xonotlitkristallen o.ä., die Bildung von Poren und/oder Mikrorissen durch die hohen Temperaturen jenseits der 200°C verstärkt.

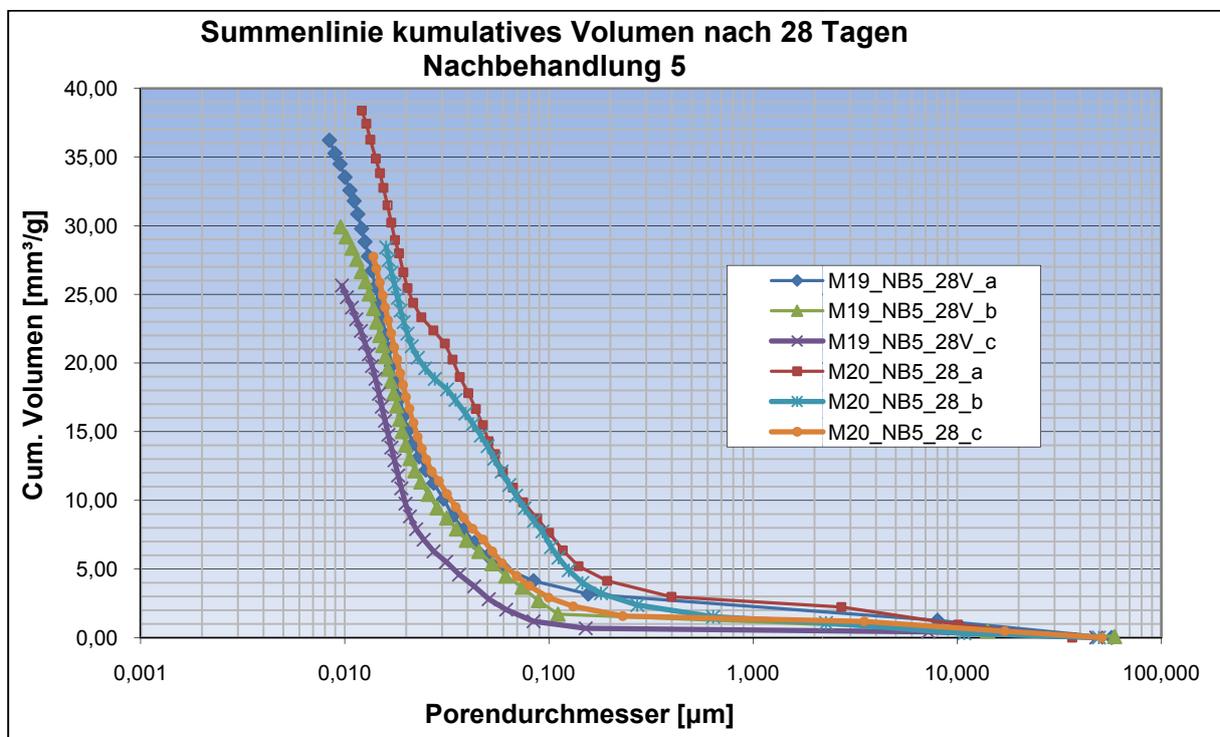


Abbildung 5.32: Summenlinie kumulatives Porenvolumen, 28.Tag; Nachbehandlung 5 (Warmofenbehandlung 250°C) nach Tabelle 3.7

Die Ergebnisse der Porenvolumenverteilung der Nachbehandlung 6 (kombinierte Wärme-/Heißwasserbehandlung) zeigen, dass die Poren in den Proben der Nachbehandlung 6 ebenfalls um bis zu 5-mal größer sind als die Poren der Proben der Nachbehandlung 1 bis 4, (siehe Abbildung 5.33). Der Großteil der Poren liegt im Größenbereich von 0,006 bis 0,02 μm . Außerdem ist es interessant, dass hier die normalgemischten und die vakuumgemischten Proben nur eine minimale Differenz in ihren Porenvolumenverteilungen aufweisen. In den nichtvakuumgemischten Proben ist ein kleiner Teil der Poren dem Bereich zwischen 0,02 bis 0,05 μm zuzuschreiben, die bei den vakuumgemischten Proben so gut wie nicht vorkommen.

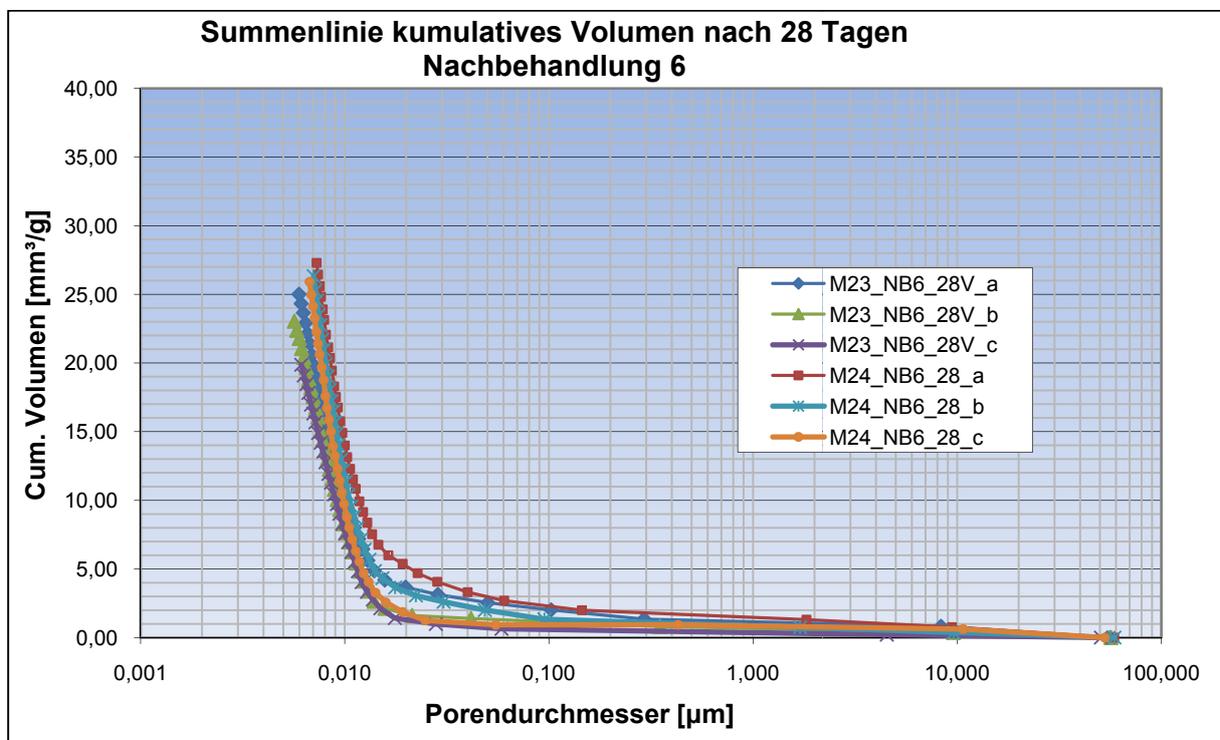


Abbildung 5.33: Summenlinie kumulatives Porenvolumen, 28.Tag; Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) nach Tabelle 3.7

5.5.5.2 Volumen der Poren mit unterschiedlichen Durchmesser

In Abbildung 5.34 sieht man den Volumenanteil der Poren der Proben der Nachbehandlung 1, aufgeteilt in die drei Größenbereiche: Gelporen, Kapillarporen und sonstige Poren. Man erkennt, dass sowohl bei den vakuumgemischten als auch bei den normalgemischten Proben zwischen 70 und 80% ihrer Poren im Bereich der Gelporen einzuordnen sind. Kapillarporen und sonstige Poren sind mit jeweils nur 10-20% im Betongefüge vertreten.

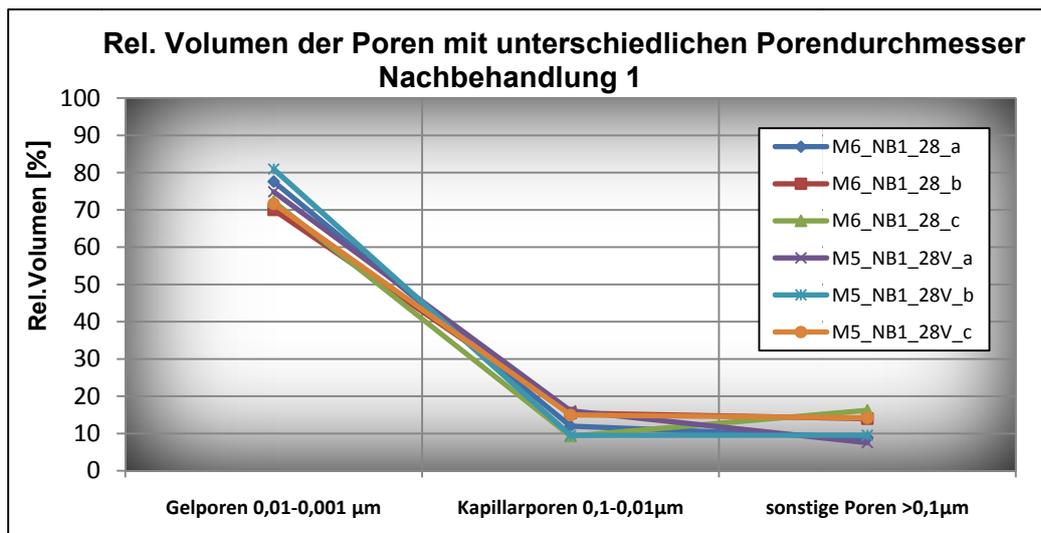


Abbildung 5.34: Rel. Volumen der Poren mit unterschiedlichen Porendurchmesser nach 28 Tagen, Nachbehandlung 1 (In Anlehnung an ÖNORM B 3303) nach Tabelle 3.7

Die Rel. Volumen der Poren der Proben der Nachbehandlung 2 weisen sehr ähnliche Kurven wie die der Nachbehandlung 1 auf. Lediglich der Anteil der Gelporen ist um ca. 5% höher, der Anteil der Kapillar- und sonstigen Poren ist eine Spur geringer.

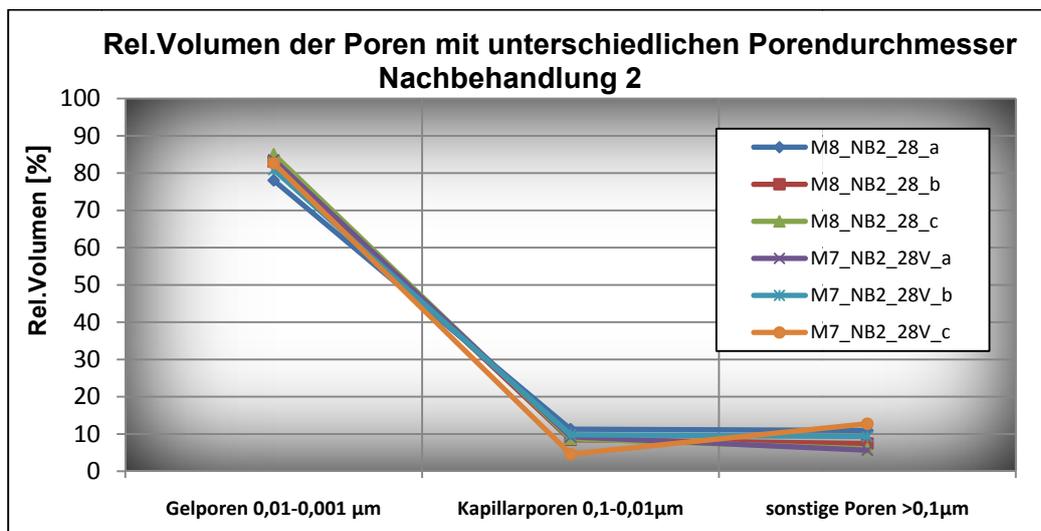


Abbildung 5.35: Rel. Volumen der Poren mit unterschiedlichen Porendurchmesser nach 28 Tagen, Nachbehandlung 2 (Lagerung an Raumluft) nach Tabelle 3.7

Die Ergebnisse in Abbildung 5.36 zeigen dass es bei den Kurven der Volumenanteile der unterschiedlichen Porendurchmesser eine größere Streuung gibt. Der Anteil der Gelporen reicht von ca. 55% auf bis zu knapp 90%, der der Kapillarporen ist im Bereich zwischen 4% und 25% zu finden und der der Poren $>0,1\mu\text{m}$ reicht von 2% auf bis zu 18%.

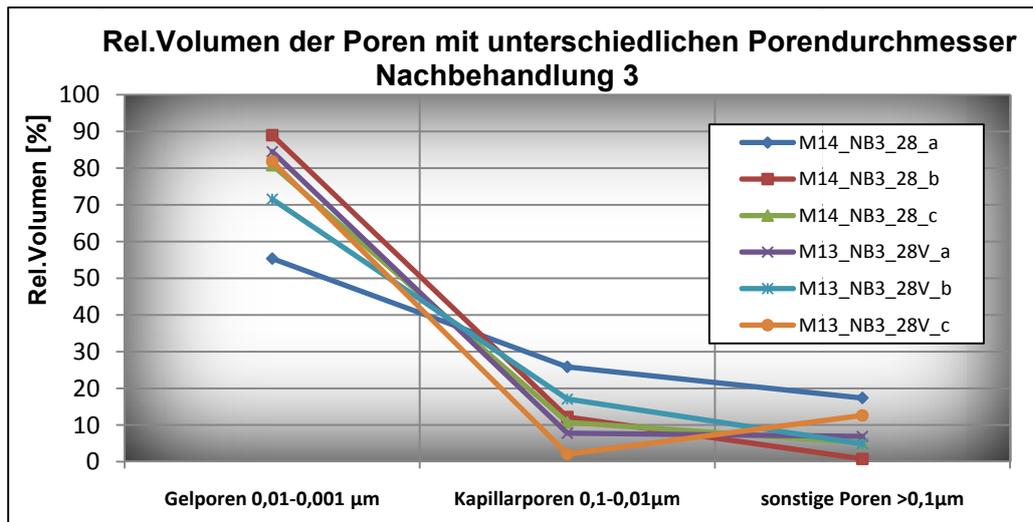


Abbildung 5.36: Rel. Volumen der Poren mit unterschiedlichen Porendurchmesser nach 28 Tagen, Nachbehandlung 3 (Warmwasserlagerung, 90°) nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.37 sieht man wieder ähnliche Volumenverteilungen wie bei der Nachbehandlung 1 und 2. So sind ca. 75-85% der Poren im Bereich der Gelporen einzuordnen. Zwischen den vakuum- und normalgemischten Proben ist kaum ein Unterschied zu bemerken.

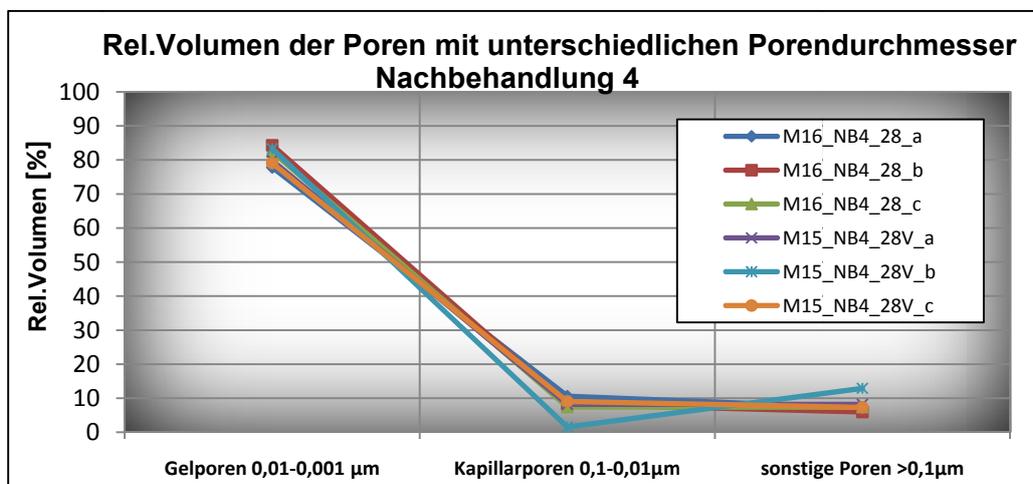


Abbildung 5.37: Rel. Volumen der Poren mit unterschiedlichen Porendurchmesser nach 28 Tagen, Nachbehandlung 4 (Warmofenbehandlung, 90°) nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.28 sind die Kurven im Vergleich zu den bisherigen Abbildungen eklatant unterschiedlich. Der Anteil der Gelporen in den Proben der Nachbehandlung 5 liegt bei nur 25 bis knapp 40%. Demgegenüber sind die Kapillarporen mit 54 bis knapp 65% in der Betonstruktur zu finden. Offensichtlich sind die zusätzlichen Kapillarporen durch die hohen Temperaturen jenseits der 200°C entstanden. Ebenfalls lässt sich in dieser Abbildung kaum ein Unterschied zwischen den vakuumgemischten und den normalgemischten Proben erkennen.

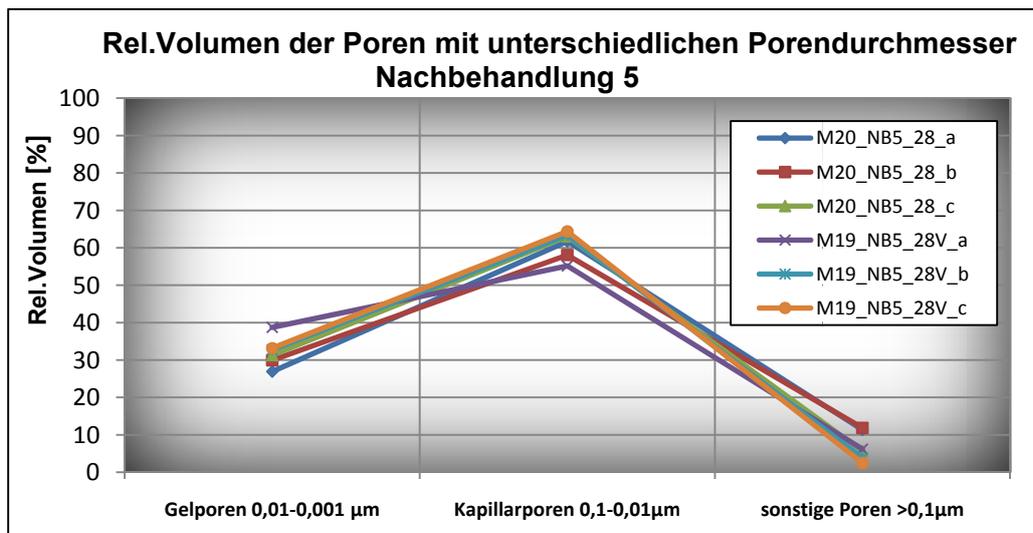


Abbildung 5.38: Rel. Volumen der Poren mit unterschiedlichen Porendurchmesser nach 28 Tagen, Nachbehandlung 5 (Warmofenbehandlung, 250°) nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.39 der Anteil der Gelporen wieder mit 80-85% am höchsten. Interessant ist, dass hier die Poren >0,1µm nur einen Anteil von knapp unter 7% haben.

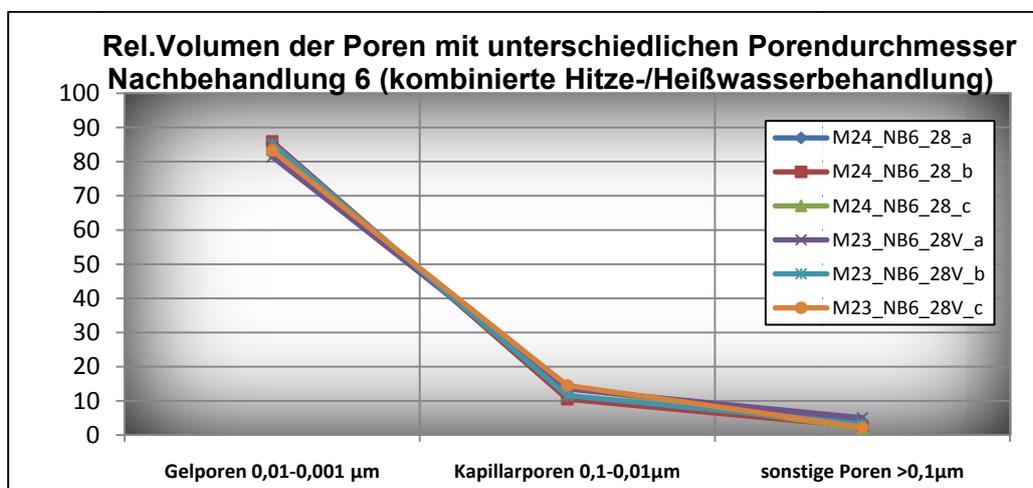


Abbildung 5.39: Rel. Volumen der Poren mit unterschiedlichen Porendurchmesser nach 28 Tagen, Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) nach Tabelle 3.7

5.5.5.3 Gesamtporosität

In die Abbildung 5.40 sind die Ergebnisse der Messungen der Gesamtporosität jeder einzelnen Nachbehandlungsmethode der normal- und vakuumgemischten Proben eingetragen. Die Werte sind als Mittelwert der jeweils 3 aus einem zerstörten Prisma herausgebohrten ca. 1 bis 1,5 g schweren Zylinder zu verstehen.

Vergleicht man nun die Ergebnisse der vakuumgemischten mit denen ihrer normalgemischten Gegenproben, so kann man folgendes feststellen. Die Porosität der normalgemischten Proben ist von 19,6% (Nachbehandlung 5) bis zu 125,9% (Nachbehandlung 4) höher als die der vakuumgemischten Proben. Im Schnitt beträgt der Unterschied 74,8%. Die niedrigste Gesamtporosität erreichten die Proben der Nachbehandlung 1 (In Anlehnung an die ÖNORM B3303). Vergleichbar niedrige Ergebnisse erreichten die Proben der Nachbehandlung 3 (Heißwasser, 90°C) und der Nachbehandlung 4 (Wärmebehandlung, 90°C). Die Proben der Nachbehandlungen 5 und 6 hingegen zeigen Werte, die um bis zu 227,3% (vakuumgemischt) beziehungsweise um bis zu 141,65% (nichtvakuumgemischt) höher sind als die Porosität der Nachbehandlungsmethode 1. Offensichtlich verursacht die Lagerung des Betons bei Temperaturen über 200°C eine zunehmende Bildung von Porenraum.

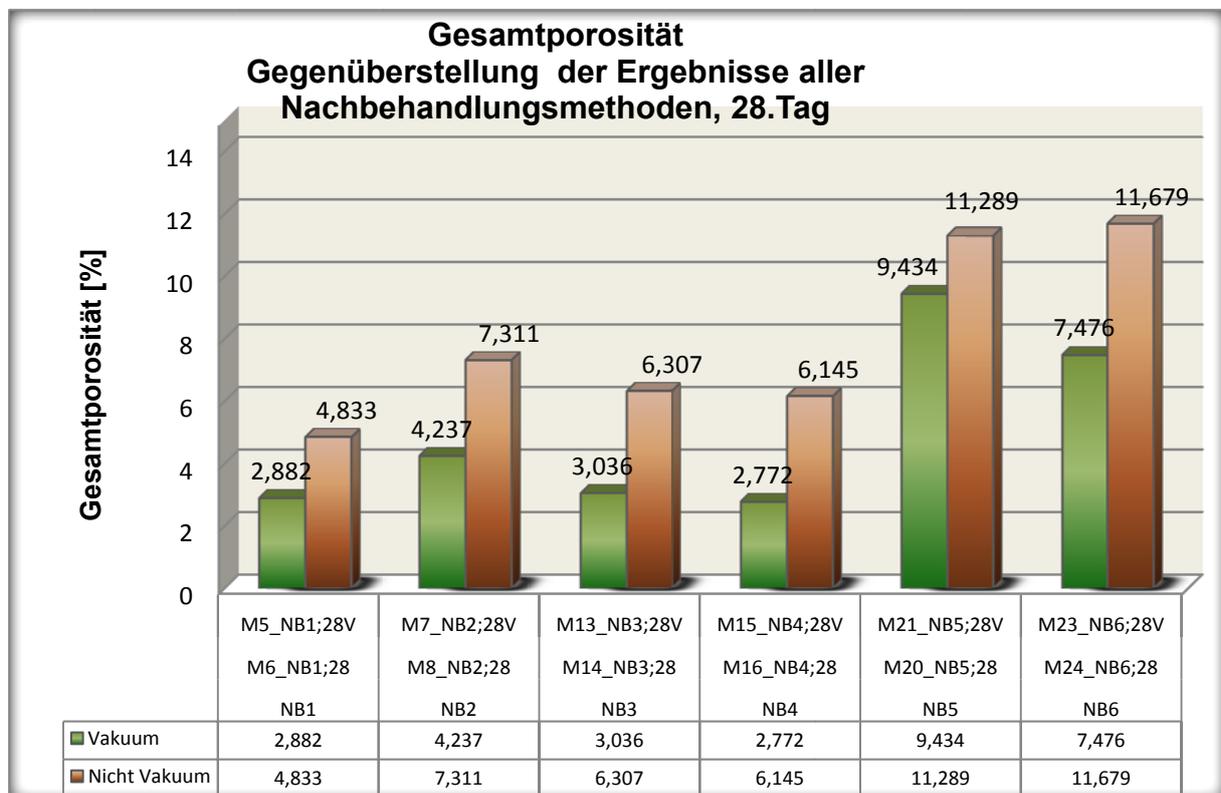


Abbildung 5.40: Gesamtporosität aller Nachbehandlungsmethoden

5.6 Zusammenhänge und Interpretation

5.6.1 Ausbreitmaß und Luftgehalt

In Abbildung 5.41 wird der Zusammenhang des Luftgehalts mit dem Ausbreitmaß der Frischbetonmischungen dargestellt. Wie man sieht, sind die beiden Kurven mit wenigen Ausnahmen kongruent, das heißt ein höherer Luftgehalt bedeutet in der Regel auch ein höheres Ausbreitmaß. Physikalisch ist dies dadurch zu erklären, dass die Luft in der Frischbetonmischung wie eine Art Schmiermittel wirkt, das die innere Reibung der Masse herabsenkt. Das bedeutet desto weniger Luftgehalt, desto höher die innere Reibung, desto höher das Ausbreitmaß.

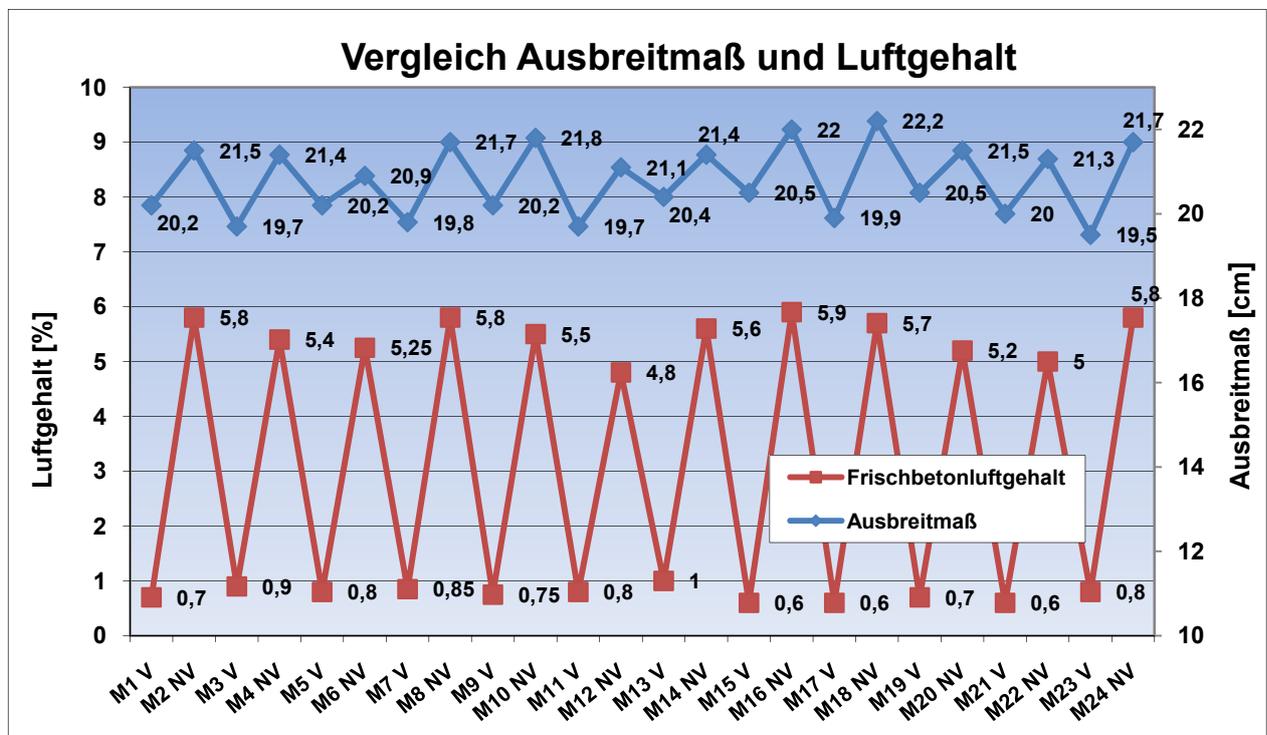


Abbildung 5.41: Vergleich Ausbreitmaß und Luftgehalt

5.6.2 Frischbetonrohddichte und Luftgehalt

In Abbildung 5.42 wird der Zusammenhang der Frischbetonrohddichte mit dem Luftgehalt der Frischbetonmischungen dargestellt. Wie man sieht sind die beiden Kurven gegensinnig kongruent. Man kommt zu dem Schluss, dass die Frischbetone mit mehr Luftgehalt tendenziell eine geringere Rohddichte besitzen. So sind ausnahmslos die vakuumgemischten Betone dichter als die normalgemischten Betone.

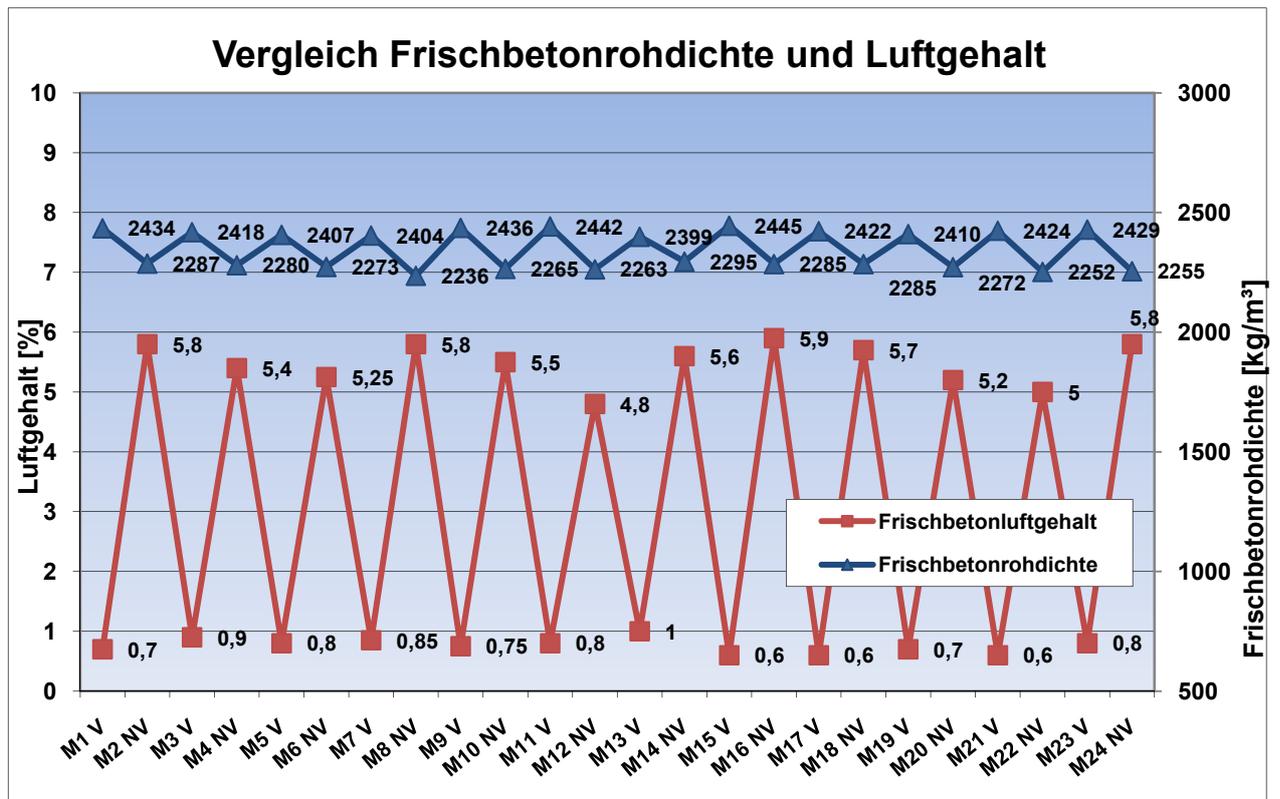


Abbildung 5.42: Vergleich Frischbetonrohddichte und Luftgehalt

5.6.3 Vergleich der Festbetondichten aller Nachbehandlungen

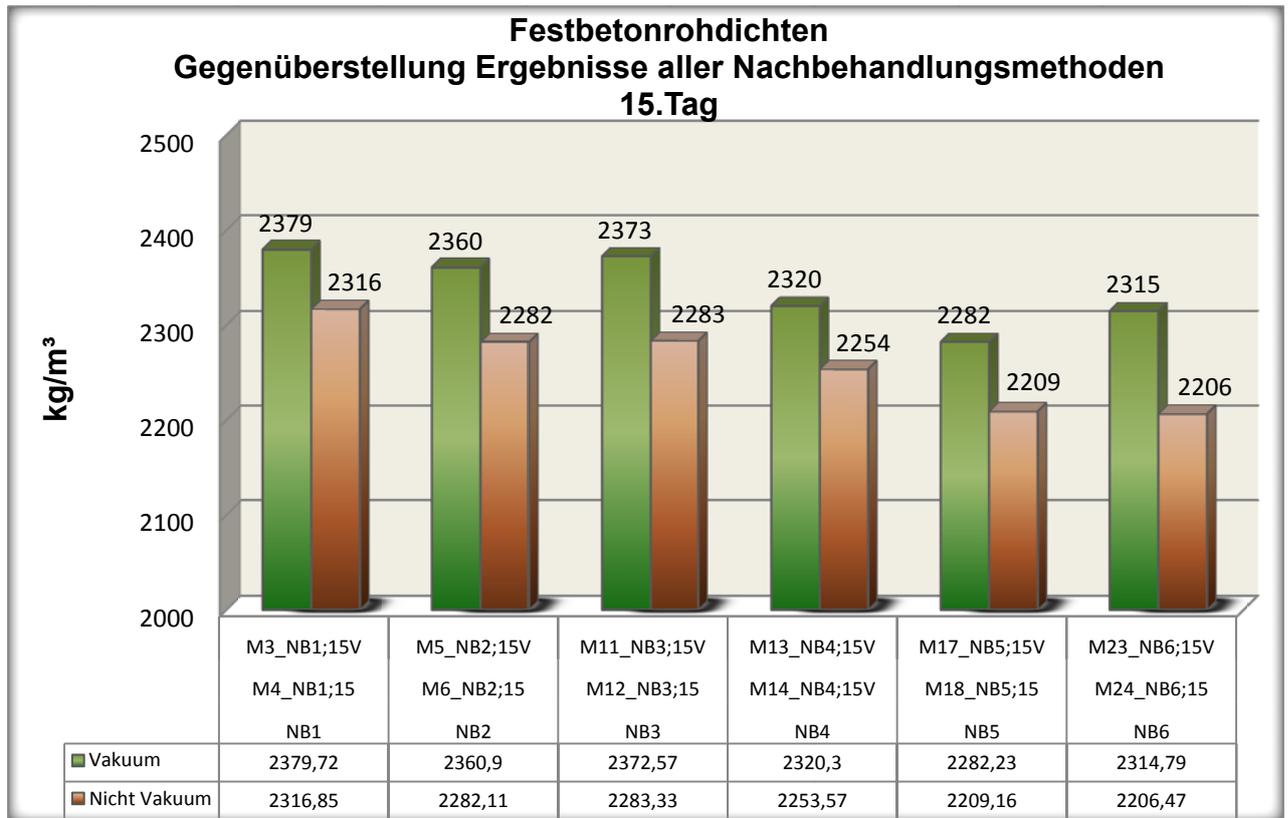


Abbildung 5.43: Festbetonrohndichten aller Nachbehandlungen, 15.Tag

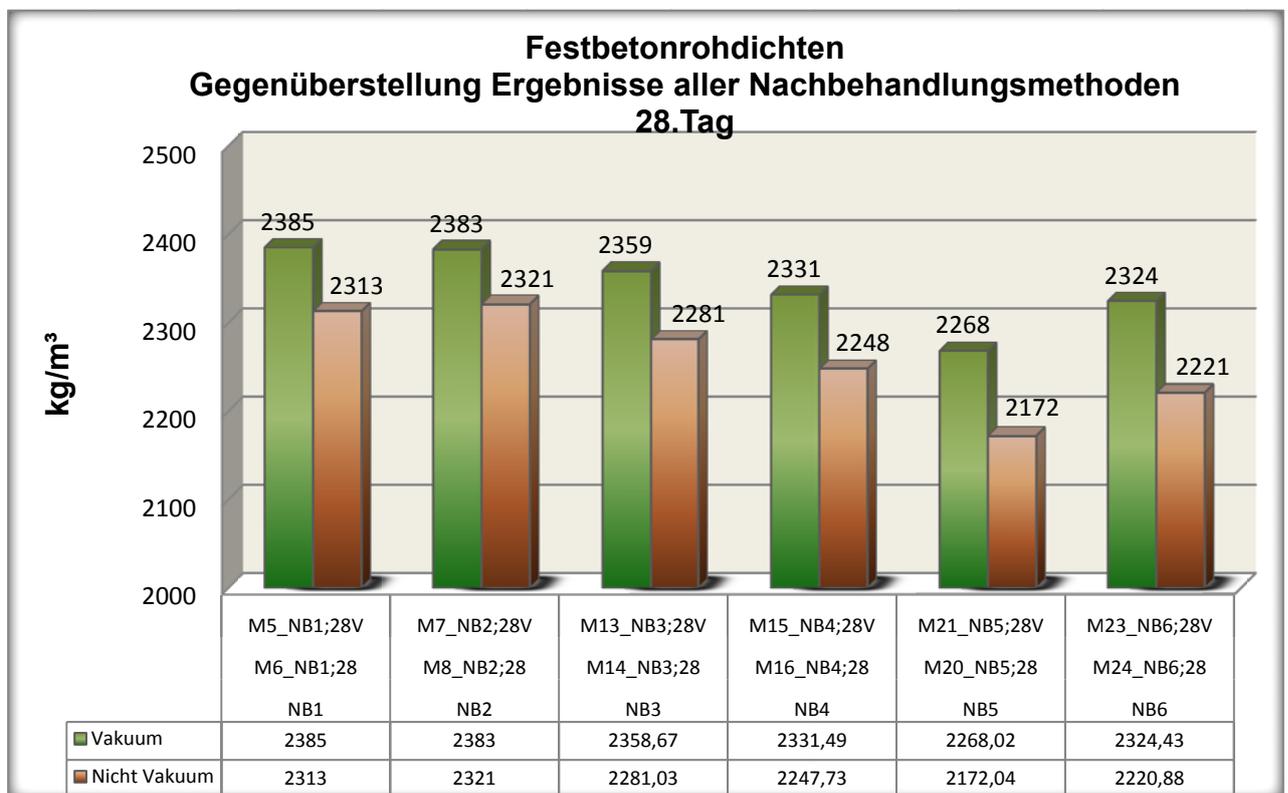


Abbildung 5.44: Festbetonrohndichten aller Nachbehandlungen, 28.Tag

Die Abbildung 5.43 und Abbildung 5.44 zeigen die Differenzen der Rohdichten der unterschiedlich nachbehandelten Probeserien am 15. und am 28.Tag nach dem Ausschalen.

Auffallend ist, dass die nichtvakuumbehandelten Proben eine um 3-5% geringere Festbetonrohddichte haben. Außerdem zeigt dieses Diagramm, dass eine Wärmebehandlung, sowohl eine Behandlung mit Heißwasser, als auch eine mit Warmluft, eine gewisse Reduzierung der Festbetonrohddichten nach sich zieht. So ist die gemessene Festbetonrohddichte der nur an der Raumluft oder im Kaltwasser gelagerten Proben um 2-3% höher als die der mit Wärme nachbehandelten Proben. Dies ist durch die Wärmebehandlung begünstigte Verdunstung von Porenwasser und auch durch eventuell stattfindende chemische Reaktionen zu erklären.

5.6.4 Vergleich der Biegezugfestigkeiten aller Nachbehandlungen

In Abbildung 5.45 sind zu jeder Nachbehandlungsmethode die zugehörigen Biegezugfestigkeitsverläufe der vakuumgemischten Proben eingetragen. Es zeigt sich, dass am 28.Tag die Proben, die mit der Nachbehandlungsmethode 4 (Warmofenbehandlung 90°C) behandelt wurden, den absolut höchsten Wert zu verzeichnen haben. Im Vergleich zu den Proben der Nachbehandlung 1 (in Anlehnung an die ÖNORM B3303) und den Proben der Nachbehandlung 2 (An Raumlufte) konnten die Biegezugfestigkeiten um 35% beziehungsweise um 36% gesteigert werden. Knapp darunter sind die Ergebnisse der Proben der Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) einzuordnen.

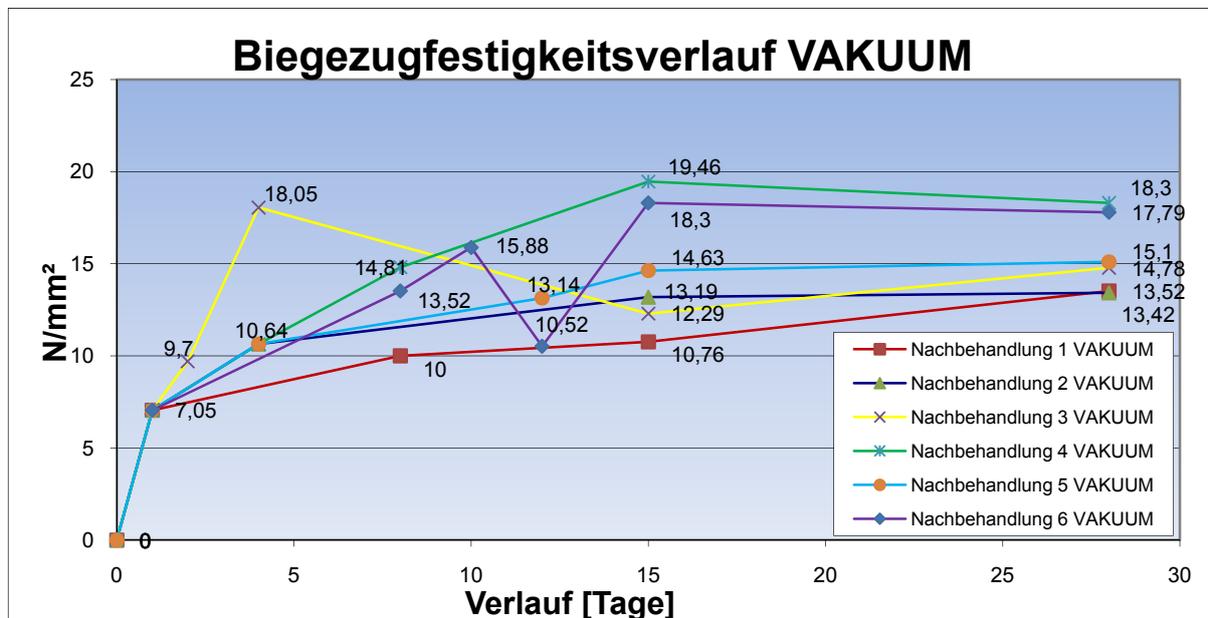


Abbildung 5.45: Biegezugfestigkeitsverlauf vakuumgemischte Proben

Abbildung 5.46 zeigt die Verläufe der Biegezugfestigkeit der nichtvakuumgemischten Proben. Interessanterweise übersteigen die Ergebnisse der nichtvakuumgemischten Proben der Nachbehandlung 6 die äquivalenten Werte der vakuumgemischten Proben. Insgesamt sind die Ergebnisse der Nachbehandlung 6 um 91,3% höher als die der Nachbehandlung 2, die die niedrigsten Biegezugfestigkeiten zu verzeichnen hatte. Außerdem auffallend ist, dass die Ergebnisse der Nachbehandlung 3, vakuum- und nichtvakuumgemischt, schon nach 4 Tagen eine sehr hohe Biegezugfestigkeit aufzeigen, die jedoch bis zum 28.Tag wieder auf durchschnittliches Maß zurückgehen.

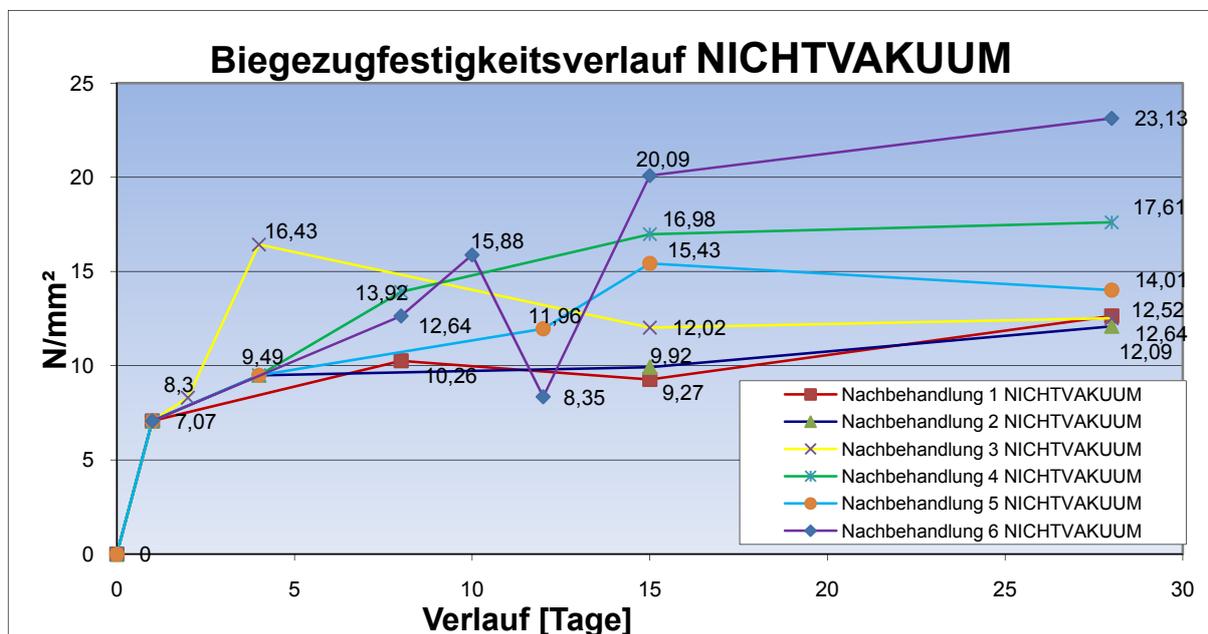


Abbildung 5.46: Biegezugfestigkeitsverlauf nichtvakuumgemischte Proben

Betrachtet man die Biegezugfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 3 (Warmwasserlagerung 90°C) genauer, kann man erkennen, dass die Festigkeiten durch die Behandlung mit dem 90°C warmen Wasser innerhalb von nur 2 Tagen um mehr als 86% (Vakuum) beziehungsweise um mehr als 97,9% (Nichtvakuum) anstiegen. Durch die Warmwasserbehandlung wird offenbar die Hydratation des Zements sehr stark beschleunigt. Im weiteren Verlauf sanken die Biegezugfestigkeiten wieder bis zum 28.Tag um 13,6% (Vakuum) beziehungsweise um 23% (Nichtvakuum). Im Endeffekt bewirkte diese Nachbehandlung, dass schon am 4.Tag eine sehr hohe Festigkeit abrufbar war, die aber bis zum 28.Tag wieder eklatant sank.

Die Biegezugfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 4 (Warmofenbehandlung, 90°C) zeigen eine kontinuierliche Steigerung bis zur Prüfung am 28.Tag. So erreichte man mithilfe der Behandlung der Probekörper mit 90°C Heißluft im Vergleich zu den Ergebnissen der Nachbehandlung 2 (Lagerung an Raumluft) um 36,36% (Vakuum) beziehungsweise um 45,65% (Nichtvakuum) höhere 28-Tagefestigkeiten. Es scheint als ob die Hitzebehandlung die Mikrostruktur der Hydratationsprodukte modifiziert hat, die damit dem Beton eine höhere Biegezugfestigkeit lieferten. Bei den vakuumgemischten Proben konnte die Nachbehandlung 4 die höchste und bei den normalgemischten Proben die zweithöchste Biegezugfestigkeit erreichen.

Bei Betrachtung der Biegezugfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 5 (Warmofenbehandlung 250°C), sieht man, dass die Steigungen der Festigkeitsverläufe vom 4. bis zum 11. Tag, während die Proben in dem Ofen bei 250°C gelagert waren, ähnlich flach sind wie die Steigungen der Kurven der Nachbehandlung 1 und 2. Erst zwischen dem 12. und dem 15. Tag ist eine stärkere Erhöhung der Festigkeit zu erkennen. Danach flachen die Kurven wieder ab (Vakuum), beziehungsweise sinken etwas (Nichtvakuum) bis zum 28.Tag. Im Endeffekt konnten durch diese Nachbehandlung im Vergleich zu den Ergebnissen der Nachbehandlung 2 um 12,5% (Vakuum) beziehungsweise um 15,88% (Nichtvakuum) höhere 28-Tagebiegezugfestigkeiten erzielt werden.

Die Festigkeitsverläufe der vakuumgemischten und der nichtvakuumgemischten Proben der Nachbehandlung 6 (Kombinierte Heißwasser/Wärmebehandlung) sind beide von einem großen Festigkeitseinbruch am 12.Tag, also unmittelbar nachdem die Proben aus dem 200°C Ofen genommen wurden, geprägt. Hier gingen die Biegezugfestigkeiten innerhalb von 2 Tagen um 48% (Nichtvakuum) beziehungsweise um 34% (Vakuum) zurück. Möglicherweise sind hier durch zu schnelles Abkühlen der Proben Mikrorisse entstanden, die die Biegezugfestigkeit enorm verschlechtert haben. 4 Tage später jedoch konnten die Proben wieder verhältnismäßig hohe Ergebnisse erzielen. So stiegen die Biegezugfestigkeiten der vakuumgemischten Proben wieder um 73,9% und die der normalgemischten Proben gar um 140,5% (bezogen auf die 12-Tagefestigkeiten). In weiterer Folge blieben die Festigkeiten dieser Nachbehandlung auf diesem Niveau oder konnten sogar noch um 15% (Nichtvakuum) zulegen.

Zusammengefasst kann man sagen, dass die höchste (Nachbehandlung 6 nichtvakuumgemischt, Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) die niedrigste 28-

Tagebiegezugfestigkeit (Nachbehandlung 2 nichtvakuumgemischt, Lagerung an Raumluft) um 91,3% übersteigt.

5.6.5 Vergleich der Spaltzugfestigkeiten aller Nachbehandlungen

In Abbildung 5.47 sind zu jeder Nachbehandlungsmethode die zugehörigen Spaltzugfestigkeitsverläufe der vakuumgemischten Proben eingetragen. Die Ergebnisse der Proben der Nachbehandlung 4 (Warmofenbehandlung 90°C) und der Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) sind im Vergleich zu den Ergebnissen der Nachbehandlung 2 (Lagerung an Raumluft) und 1 (In Anlehnung an ÖNORM B3303) um 28,7% beziehungsweise um 10,51% höher.

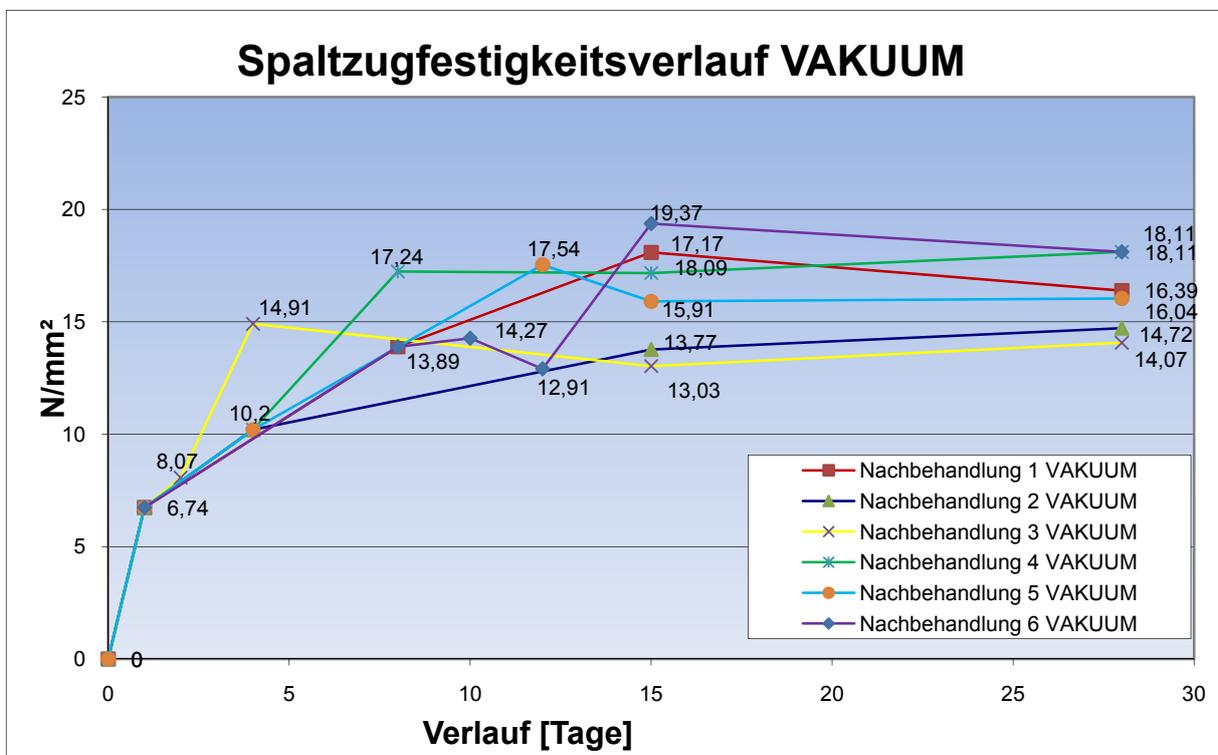


Abbildung 5.47: Spaltzugfestigkeitsverlauf vakuumgemischte Proben

In Abbildung 5.48 sind zum Vergleich zu jeder Nachbehandlungsmethode die zugehörigen Spaltzugfestigkeitsverläufe der nichtvakuumgemischten Proben eingetragen. Die Ergebnisse der Proben der Nachbehandlung 6 sind im Vergleich zu den Ergebnissen der Nachbehandlung 1 und 2 um ca.37,5% beziehungsweise um 33,8% höher.

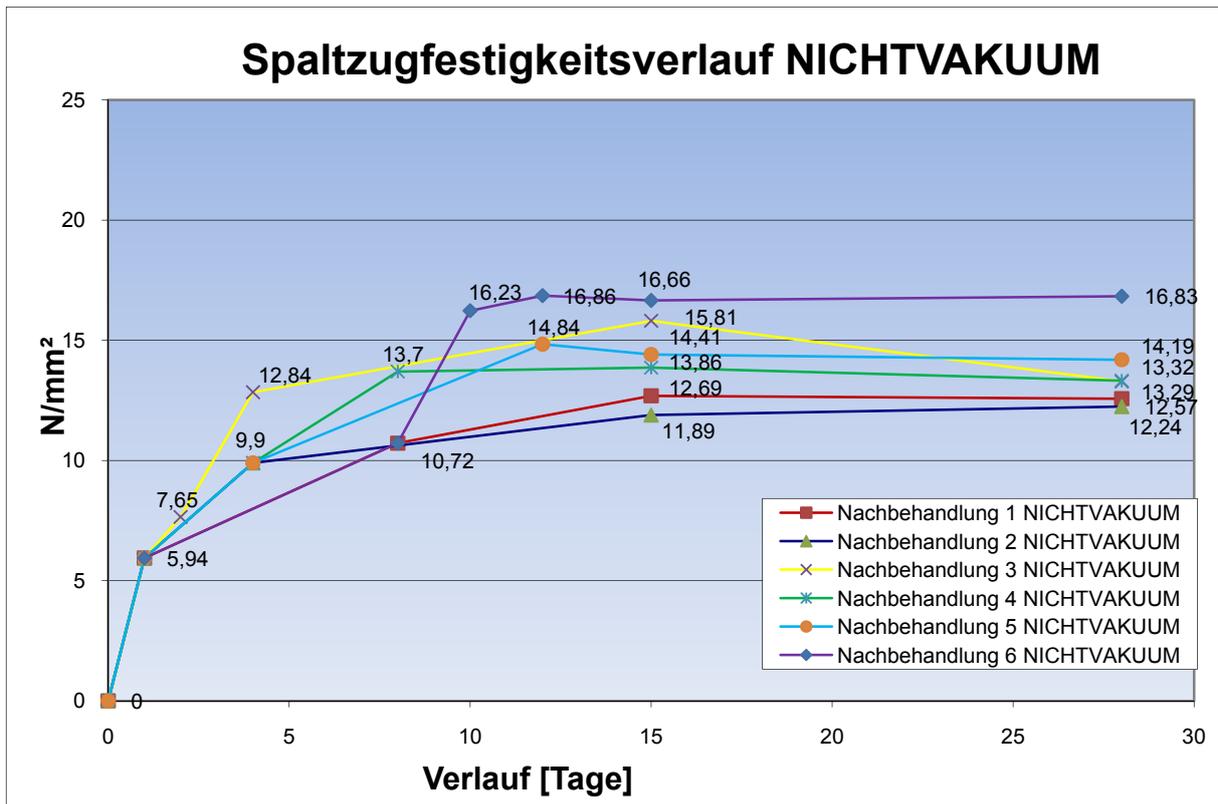


Abbildung 5.48: Spaltzugfestigkeitsverlauf nichtvakuumgemischte Proben

Betrachtet man die Spaltzugfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 3 (Warmwasser-Behandlung 90°C) genauer, kann man erkennen, dass die Festigkeiten durch die Behandlung mit dem 90°C warmen Wasser innerhalb von nur 2 Tagen um mehr als 84% (Vakuum) beziehungsweise um mehr als 65,2% (Nichtvakuum) anstiegen. Durch die Warmwasserbehandlung wird offenbar die Hydratation des Zements sehr stark beschleunigt. Im Endeffekt bewirkte diese Nachbehandlung, dass schon am 4.Tag eine leicht höhere Festigkeit vorhanden war, als dann während der Prüfung der 28-Tagefestigkeit zu messen war.

Die Spaltzugfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 4 (Warmofenbehandlung, 90°C) zeigen ähnliche Kurven der Festigkeitsverläufe der Ergebnisse der Nachbehandlung 1 und 2, jedoch auf einem höheren Niveau. So erreichte man mithilfe der Behandlung der Probekörper mit 90°C im Ofen im Vergleich zu den Ergebnissen der

Nachbehandlung 2 um 23,02% (Vakuum) beziehungsweise um 8,8% (Nichtvakuum) höhere 28-Tagefestigkeiten. Es scheint als sicher, dass die Hitzebehandlung die Mikrostruktur der Hydratationsprodukte derart modifiziert hat, sodass die im Beton eine höhere Spaltzugfestigkeit ergeben.

Bei Betrachtung der Spaltzugfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 5 (Warmofenbehandlung, 250°C), sieht man, dass die Festigkeiten am 12.Tag, also nachdem die Proben aus dem Ofen genommen wurden, ihr Maximum aufweisen. Anschließend sanken die Ergebnisse innerhalb von 3 Tagen wieder um 10,3% (Vakuum) beziehungsweise um 2,9%. Dies ist eventuell durch eine im Zuge der hohen Temperaturen begünstigte Bildung von Mikrorissen zu erklären. Bis zur 28-Tagefestigkeit blieben die Werte auf ähnlichem Niveau.

Die Festigkeitsverläufe der vakuumgemischten und der nichtvakuumgemischten Proben der Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) unterscheiden sich eklatant voneinander. So ist bei den vakuumgemischten Proben im Vergleich zu den nichtvakuumgemischten, nach der Herausnahme der Proben aus dem Ofen am 12.Tag, eine 25,7% geringere Spaltzugfestigkeit ermittelt worden. Anschließend stieg die Festigkeit der vakuumgemischten Proben aber innerhalb von 3 Tagen um 41,8% an. Damit überholten die vakuumgemischten Proben die normalgemischten in der 15-Tagefestigkeit um 8,9%. Die Ergebnisse der 28-Tagefestigkeit blieben auf demselben Niveau. So sank die Spaltzugfestigkeit der vakuumgemischten Proben um 1,4%, während die Spaltzugfestigkeit der normalgemischten Proben um 1% stieg. Im Endeffekt blieben die Ergebnisse der vakuumgemischten um 7,6% höher als die der normalgemischten Proben.

Zusammengefasst kann man sagen, dass die höchste (Nachbehandlung 6 nichtvakuumgemischt, Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) die niedrigste 28-Tagespaltzugfestigkeit (Nachbehandlung 2 nichtvakuumgemischt, Lagerung an Raumluft) um 47,95% übersteigt.

5.6.6 Vergleich der Druckfestigkeiten aller Nachbehandlungen

Abbildung 5.49 zeigt den Verlauf der Druckfestigkeiten der vakuumgemischten Proben. Hier zeigt sich, dass die Ergebnisse der 28-Tagedruckfestigkeit der Nachbehandlung 6 die Werte der Nachbehandlung 1 und 2 um 60,9% bzw. um 50,5% übersteigen.

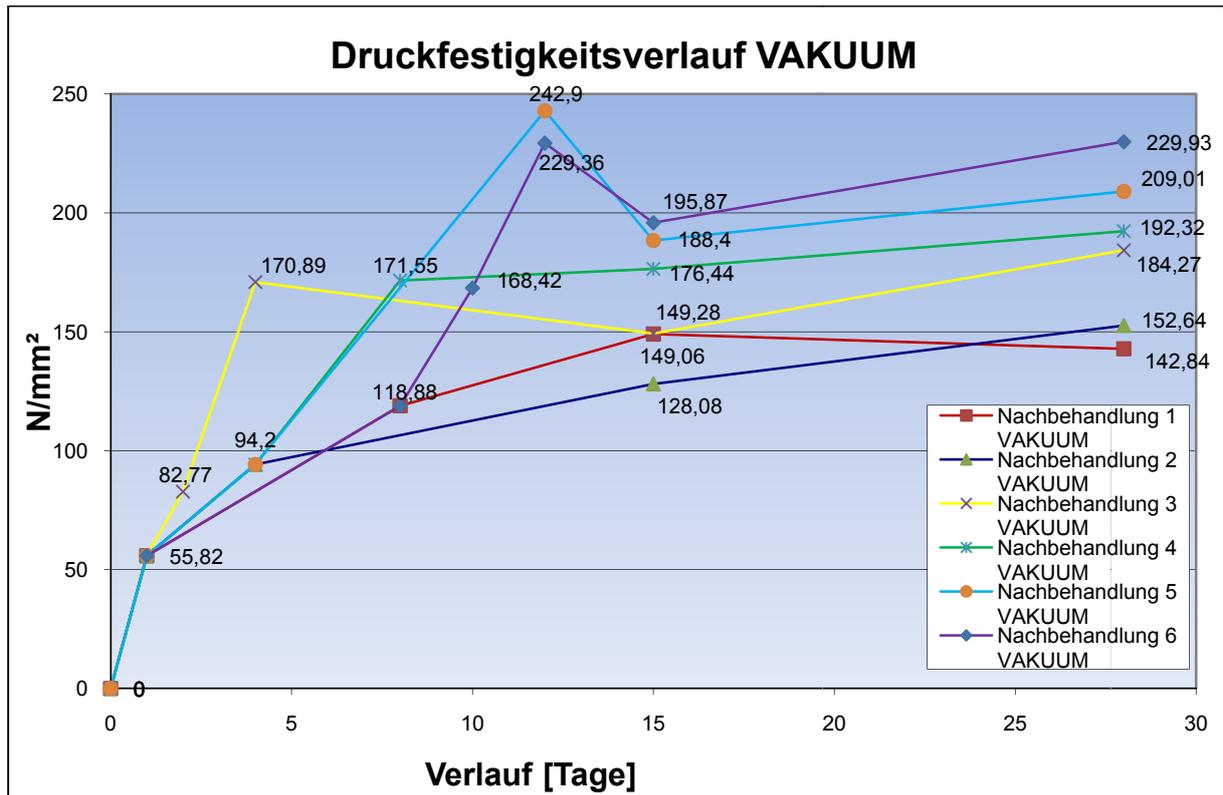


Abbildung 5.49: Druckfestigkeitsverlauf vakuumgemischte Proben

Wie man in der Abbildung 5.50 sieht, liegt die höchste 28-Tagefestigkeit der normalgemischten Proben bei der Nachbehandlung 5 (Warmofenbehandlung, 250°C). Diese konnten die Festigkeiten der Proben der Nachbehandlung 1 und der Nachbehandlung 2 um 37,6% beziehungsweise um 44,6% übertreffen.

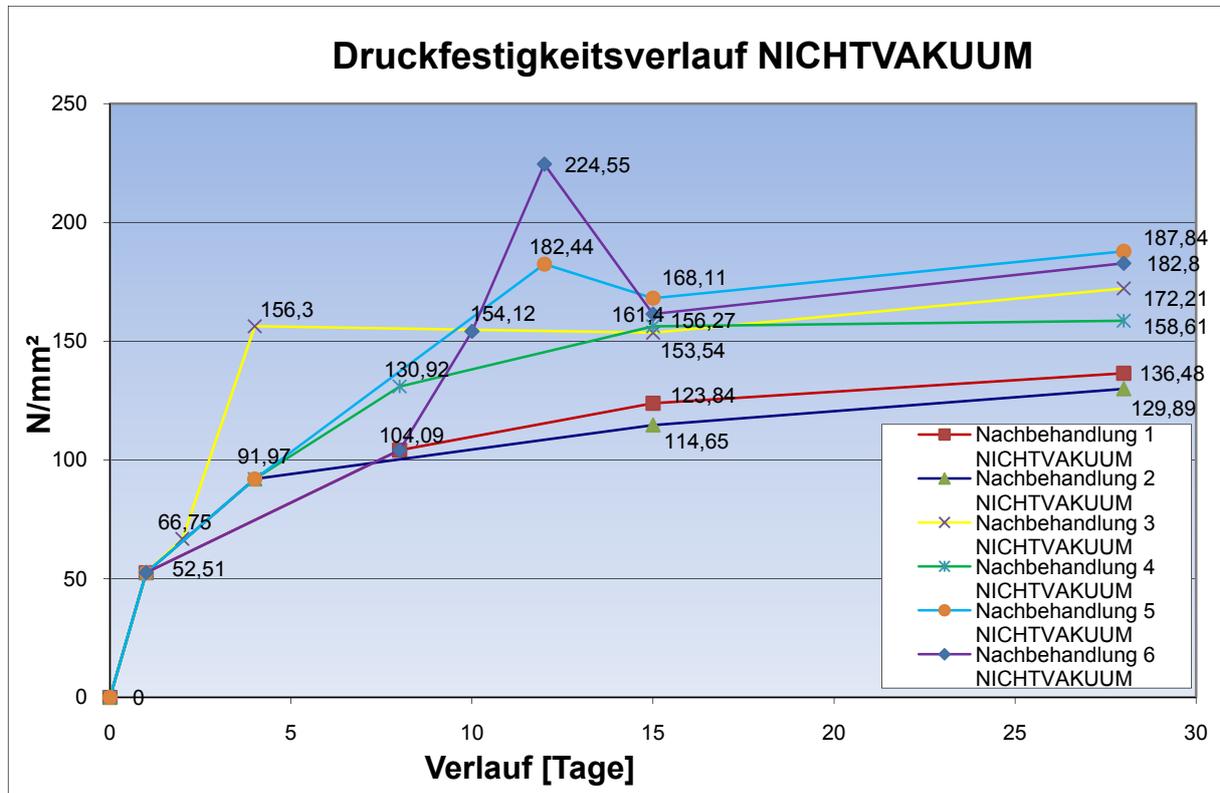


Abbildung 5.50: Druckfestigkeitsverlauf nichtvakuumgemischte Proben

Betrachtet man die Druckfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 3 (Warmwasser-Behandlung, 90°C) genauer, kann man erkennen, dass die Druckfestigkeiten durch die Behandlung mit dem 90°C warmen Wasser innerhalb von nur 2 Tagen auf mehr als das Doppelte anstiegen. Durch die Warmwasserbehandlung wird offenbar die Hydratation der des Zements sehr stark beschleunigt. Überdies werden die puzzolanischen Reaktionen des Microsilicas intensiviert. Im Endeffekt bewirkte diese Nachbehandlung, dass schon am 4.Tag über 90% der 28-Tagefestigkeit zu Verfügung stand. Jedoch blieben die 28-Tagefestigkeiten der Nachbehandlung 3 unter den Ergebnissen der Nachbehandlungen 5 und 6.

Die Druckfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 4 (Warmofenbehandlung, 90°C) zeigen zeitlich ähnliche Festigkeitssteigerungen wie die Ergebnisse der Nachbehandlung 1 und 2, jedoch auf einem höheren Niveau. So erreichte man mithilfe der Behandlung der Probekörper mit 90°C Ofentemperatur im Vergleich zu

den Ergebnissen der Nachbehandlung 2 um 26% (Vakuum) beziehungsweise um 25% (Nichtvakuum) höhere 28-Tagefestigkeiten. Es scheint als ob die Hitzebehandlung die Mikrostruktur der Hydratationsprodukte modifiziert hat, die damit dem Beton eine höhere Druckfestigkeit lieferten. Ebenfalls blieben die 28-Tagefestigkeiten unter den Ergebnissen der Nachbehandlungen 5 und 6.

Bei näherer Betrachtung der Druckfestigkeitsverläufe der Nachbehandlung 5 (Warmofenbehandlung, 250°C), sieht man wie die Festigkeiten durch die Temperaturbehandlung vom 4. bis zum 11.Tag auf ein überdurchschnittliches Maß erhöht werden konnten. Hier war der absolut höchste Druckfestigkeitswert zu verzeichnen. Vermutlicher Weise sind durch die 250°C hohen Temperaturen im Inneren des Betons kristalline Hydratphasen namens Xonotlit entstanden, die dem Beton ebendiese enormen Festigkeiten verleihen können. Anschließend sanken die Ergebnisse innerhalb von 3 Tagen wieder um 22% (Vakuum) beziehungsweise um 10,9%. Dies ist eventuell durch eine im Zuge der Xonotlitbildung teilweise einhergehende Dehydratation des bereits erstarrten Betons zu erklären. Außerdem könnte durch die hohen Temperaturen die Bildung von Mikrorissen begünstigt worden sein. Eine weitere Erklärung für den Rückgang der Druckfestigkeit könnte sein, dass die bei sehr hohen Temperaturen gebildeten kristallinen Hydratphasen bei der Lagerung an der Raumtemperatur instabil sind und sich deshalb teilweise wieder auflösen.

Bis zur 28-Tagefestigkeit stiegen die Werte wieder auf über 209 N/mm² (Vakuum) beziehungsweise auf über 187N/mm², blieben aber dennoch unter den Ergebnissen der 12-Tagefestigkeit.

Die Festigkeiten der Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) zeigen ebenfalls am 12. Tag ein Maximum. Hier konnte die hintereinander erfolgte Behandlung mit 90°C Wasser und 200°C Heißluft ebenfalls, im Vergleich zu den Ergebnissen der Nachbehandlung 1 und 2, eine erhöhte Steigerung der Festigkeit erzielen. Der anschließende Festigkeitsverlust ist vermutlich durch Mikrorisse und eine teilweise Dehydratation zu erklären. Ebenfalls sind die Druckfestigkeitsrückgänge durch eine eventuelle Instabilität der bei der Wärmebehandlung entstandenen kristallinen Hydratphasen bei Raumtemperatur zu erklären.

Zusammengefasst kann man sagen, dass die höchste (Nachbehandlung 6 vakuumgemischt, Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) die niedrigste 28-

Tagedruckfestigkeit (Nachbehandlung 2 nichtvakuumgemischt, Lagerung an Raumluft) um 77,01% übersteigt.

5.6.7 Vergleich der Entwicklungen der Biegezugfestigkeiten, Spaltzugfestigkeiten und Druckfestigkeiten

In den folgenden Abbildungen sind jeweils die Biegezugfestigkeiten, Spaltzugfestigkeiten und die Druckfestigkeiten der Proben einer Nachbehandlung eingetragen. Da die Ergebnisse der Druckfestigkeiten in der Regel eine Zehnerpotenz höher sind wie die der Biegezugfestigkeiten, beziehungsweise der Spaltzugfestigkeiten, werden diese Werte auf der rechten Sekundärordinate aufgetragen.

In Abbildung 5.51 zeigen alle Festigkeitsverläufe ähnliche Steigungen in ihren Kurven. Das bedeutet, dass sich Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und Biegezugfestigkeit allesamt in ungefähr demselben Zeitraum entwickeln. Im Vergleich der Biegezugfestigkeit mit der Spaltzugfestigkeit sieht man, dass doch die Ergebnisse der vakuumgemischten Proben bei der Spaltzugfestigkeit um 21,2% höher liegen als bei der Biegezugfestigkeit.

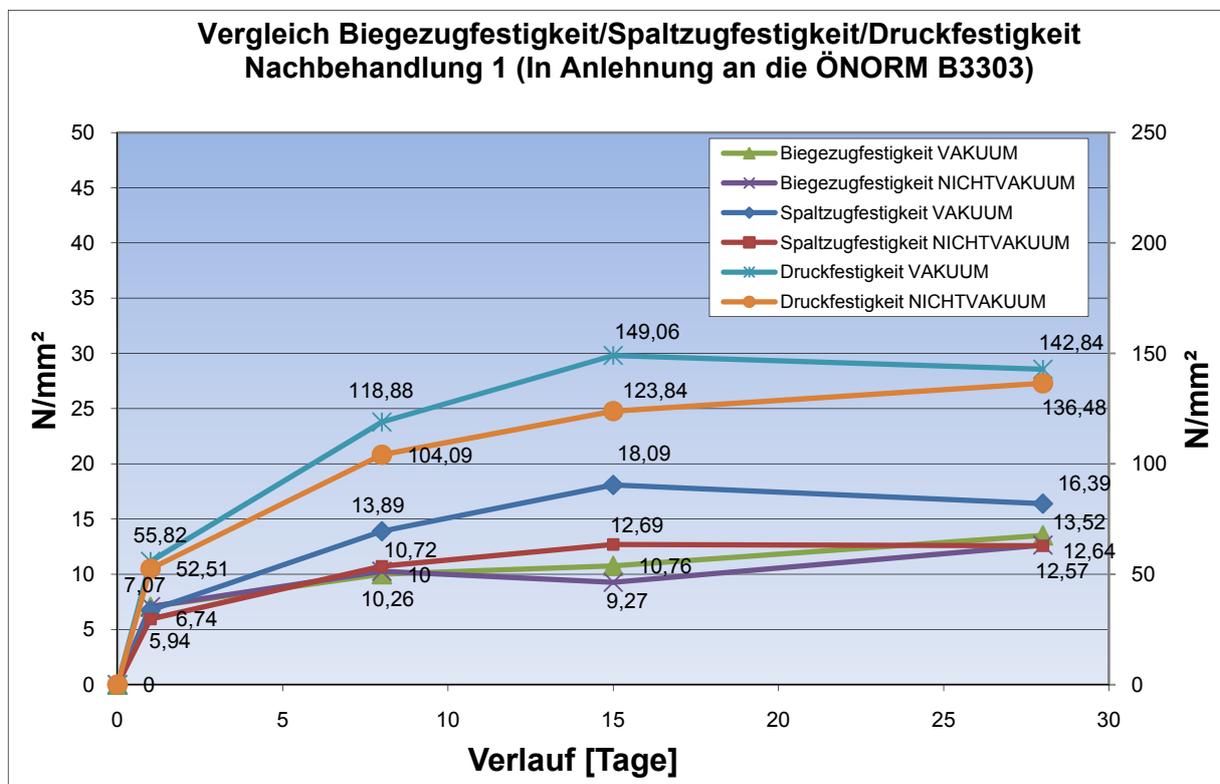


Abbildung 5.51: Vergleich aller Festigkeiten, Nachbehandlung 1 nach Tabelle 3.7

Abbildung 5.52 zeigt, dass sich nach dem 4. Tag die Spaltzugfestigkeit und die Biegezugfestigkeit nur noch sehr langsam, aber gleichmäßig weiterentwickeln. Die Druckfestigkeit hingegen kann im selben Zeitraum um 40-60% gesteigert werden. Im direkten Vergleich der Ergebnisse der Zugfestigkeiten sieht man, dass die Biegezugfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit sehr ähnliche Ergebnisse aufweisen. Wie schon bei der Nachbehandlung 1 sind die Werte der Spaltzugfestigkeit leicht über denen der Biegezugfestigkeit einzuordnen.

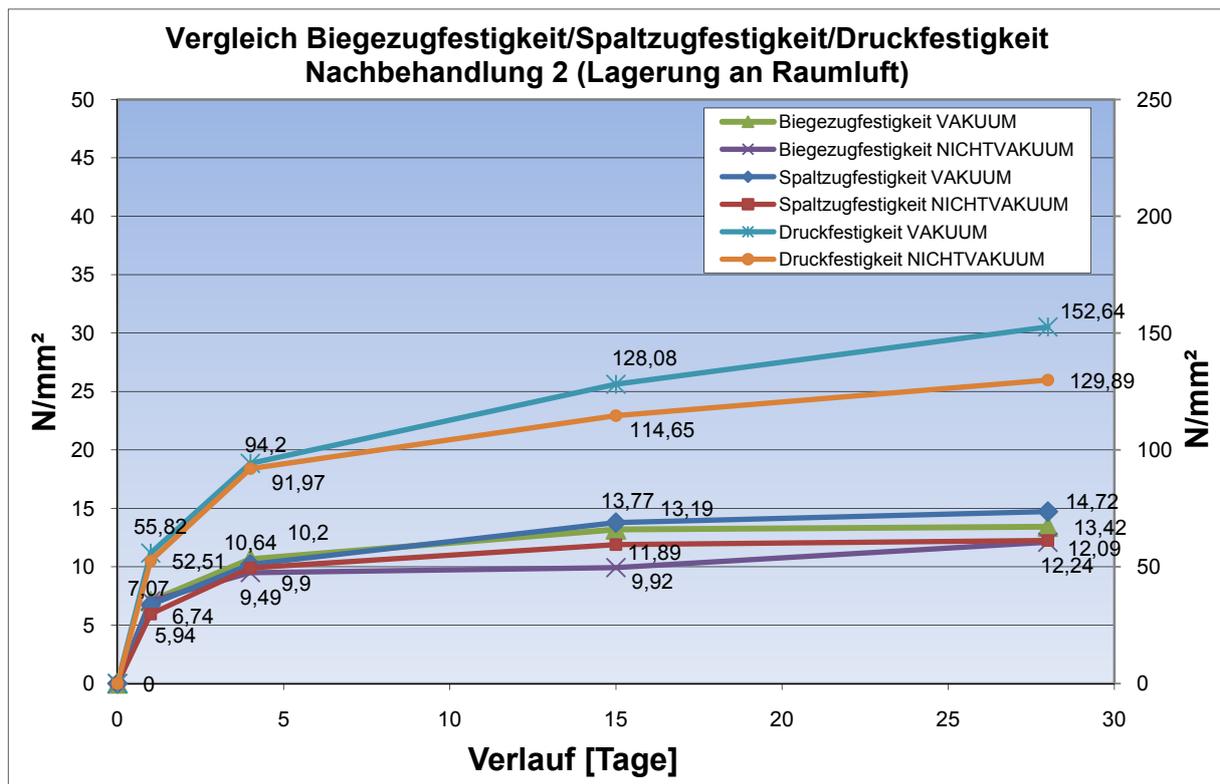


Abbildung 5.52: Vergleich aller Festigkeiten, Nachbehandlung 2 nach Tabelle 3.7

Bei Betrachtung der Abbildung 5.53 erkennt man bei allen 3 geprüften Festigkeiten ähnliche Tendenzen. So kann man vor allem vom 2. bis zum 4.Tag eine enorme Steigerung der Festigkeiten feststellen. Genau in diesem Zeitraum wurden die Proben in dem Warmwasserbecken bei 90°C gelagert, was eine starke Beschleunigung der Hydratation bewirkte. Allen Festigkeitsverläufen gleich, mit Ausnahme der Spaltzugfestigkeit der nichtvakuumgemischten Proben, ist die Tatsache, dass die Festigkeiten nach dem 4.Tag bis zum 15.Tag leicht rückgängig waren, und dann vom 15. bis zum 28.Tag wieder gestiegen sind. Zu erwähnen ist außerdem, dass zwischen den Ergebnissen der Spaltzugfestigkeit und der Biegezugfestigkeit keine gravierende Differenz zu erkennen ist.

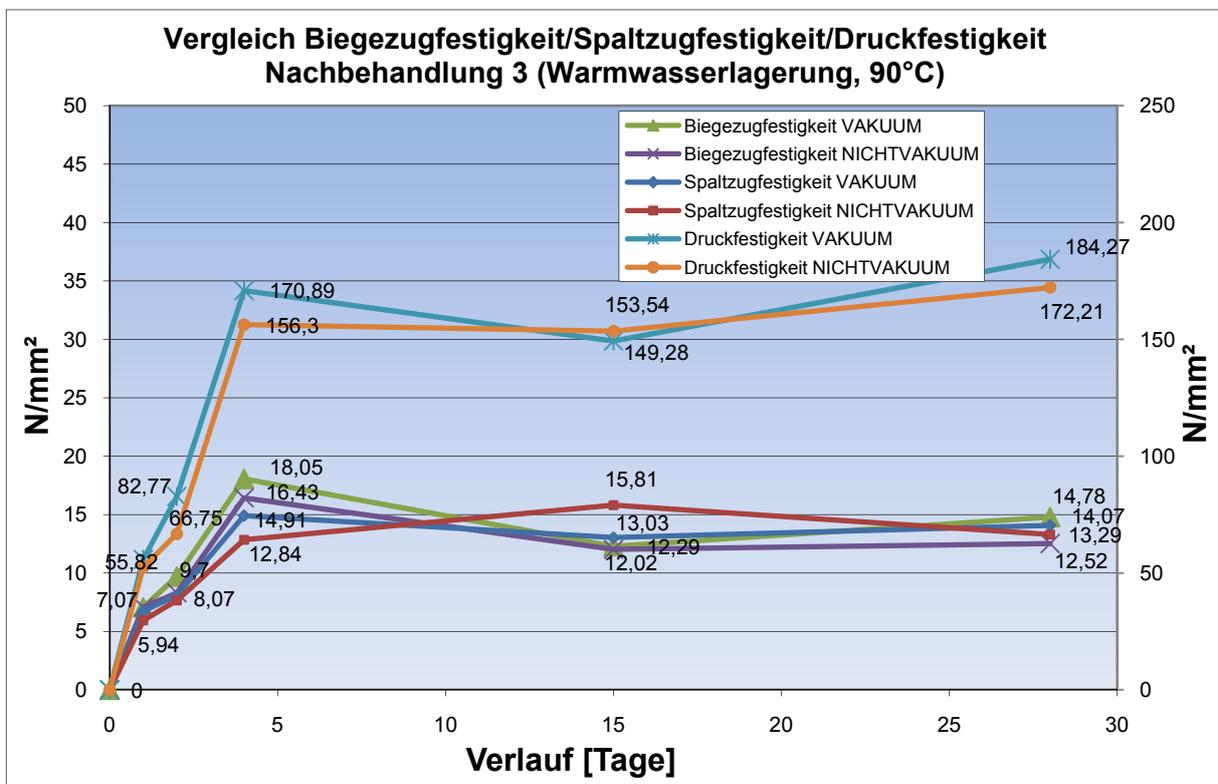


Abbildung 5.53: Vergleich aller Festigkeiten, Nachbehandlung 3 nach Tabelle 3.7

Der Vergleich der Entwicklungen der Festigkeiten der Nachbehandlung 4, (siehe Abbildung 5.54), zeigt im Grunde ebenfalls keine eklatanten Unterschiede zwischen den Kurven der Biegezugfestigkeit, der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit. Auffallend ist, dass die Ergebnisse der vakuumgemischten Proben vor allem bei der Druckfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit zwischen dem 4. und dem 8.Tag stärker steigen, als die Werte der anderen nichtvakuumgemischten Proben. Möglicherweise hat eine Nachbehandlung mit einem auf 90°C temperierten Ofen eine höhere Auswirkung auf die Hydratation von vakuumgemischtem Beton.

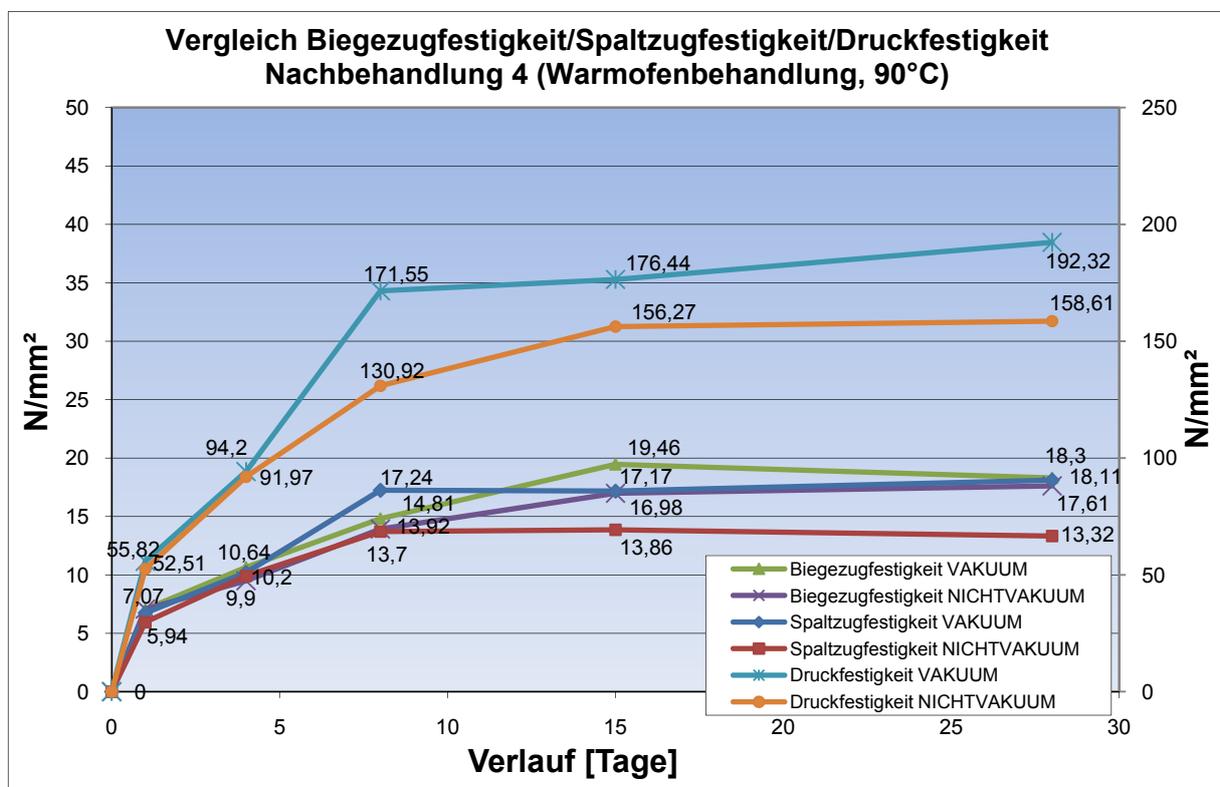


Abbildung 5.54: Vergleich aller Festigkeiten, Nachbehandlung 4 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.55 sieht man, dass sich die Kurven der Biegezugfestigkeit in ihren Tendenzen klar von den Kurven der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit unterscheidet. Während die Druck- und die Spaltzugfestigkeit nach der Spitze am Tag 12, nach Herausnahme der Proben aus dem 250°C heißen Ofen, bis zum 15.Tag mehr oder weniger stark fallen, steigen die Biegezugfestigkeiten in demselben Zeitraum ein wenig. Vom 15. bis zu 28.Tag sind die Steigungen der Kurven der Spaltzugfestigkeit und der Biegezugfestigkeit ähnlich flach.

Eine mögliche Erklärung des Rückgangs der Druckfestigkeiten nach dem 12.Tag wäre, dass die bei den Temperaturen um die 250°C entstandenen kristallinen Hydratphasen bei Raumtemperatur instabil sind und sich deshalb teilweise wieder rückbilden, bzw. auflösen.

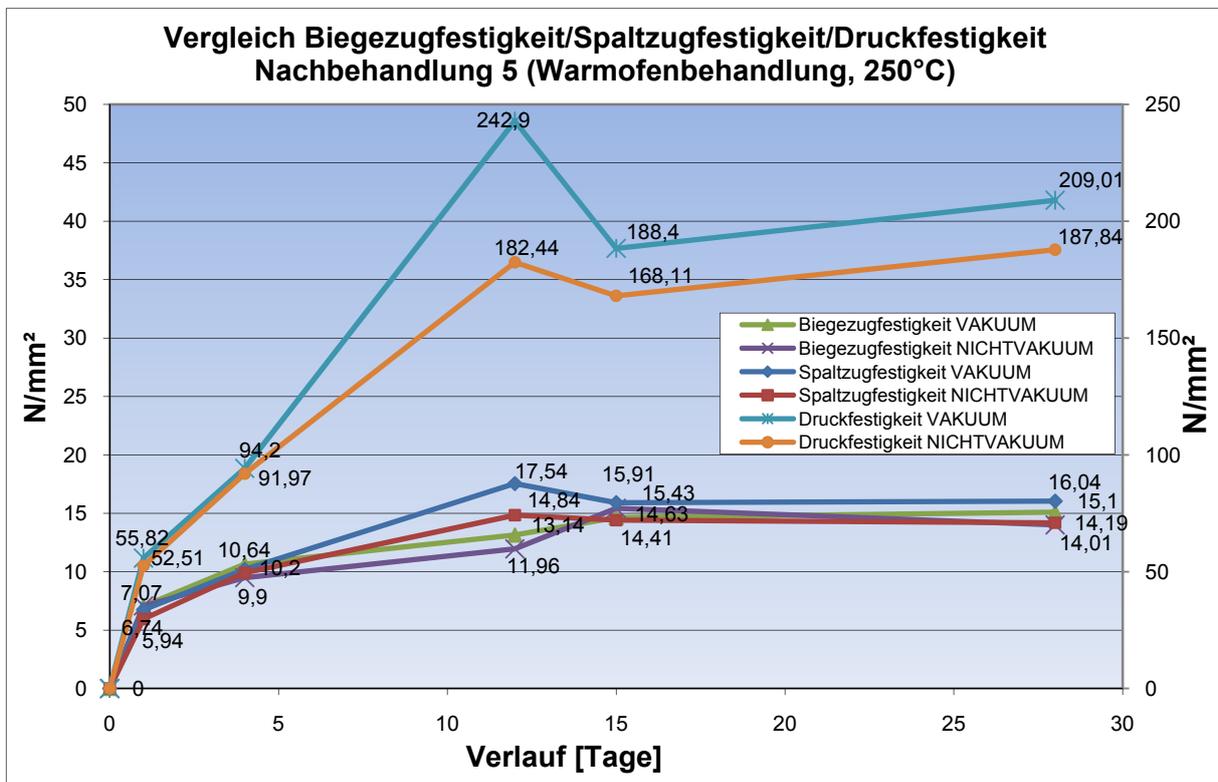


Abbildung 5.55: Vergleich aller Festigkeiten, Nachbehandlung 5 nach Tabelle 3.7

In Abbildung 5.56 kann man zwischen den Verläufen der Druck- und denen der Zugfestigkeiten gravierende Unterschiede ausmachen. Während die Druckfestigkeiten durch die kombinierte Warmwasser/Warmofenbehandlung zwischen dem 8. und dem 12.Tag enorm erhöht werden konnten, sanken die Werte der Zugfestigkeiten in demselben Zeitraum auf ein im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Nachbehandlungen, unterdurchschnittliches Maß. Anschließend konnten die Zugfestigkeiten vom 12. bis zum 15.Tag teilweise um fast 100% zulegen, während die Kurven der Druckfestigkeiten in demselben Zeitraum stark fallend sind. Die Ausnahme bildet hier der Verlauf der Spaltzugfestigkeit der normalgemischten Proben, die vom 10. bis zum 28.Tag auf dem gleichen Festigkeitsniveau blieb. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ist die Entstehung von Mikrorissen in der Abkühlphase nach der Lagerung in dem Ofen.

Die mögliche Erklärung für den Rückgang der Druckfestigkeit nach dem 12.Tag bei den Proben der Nachbehandlung 5 würde auch für die Nachbehandlung 6 zutreffen.

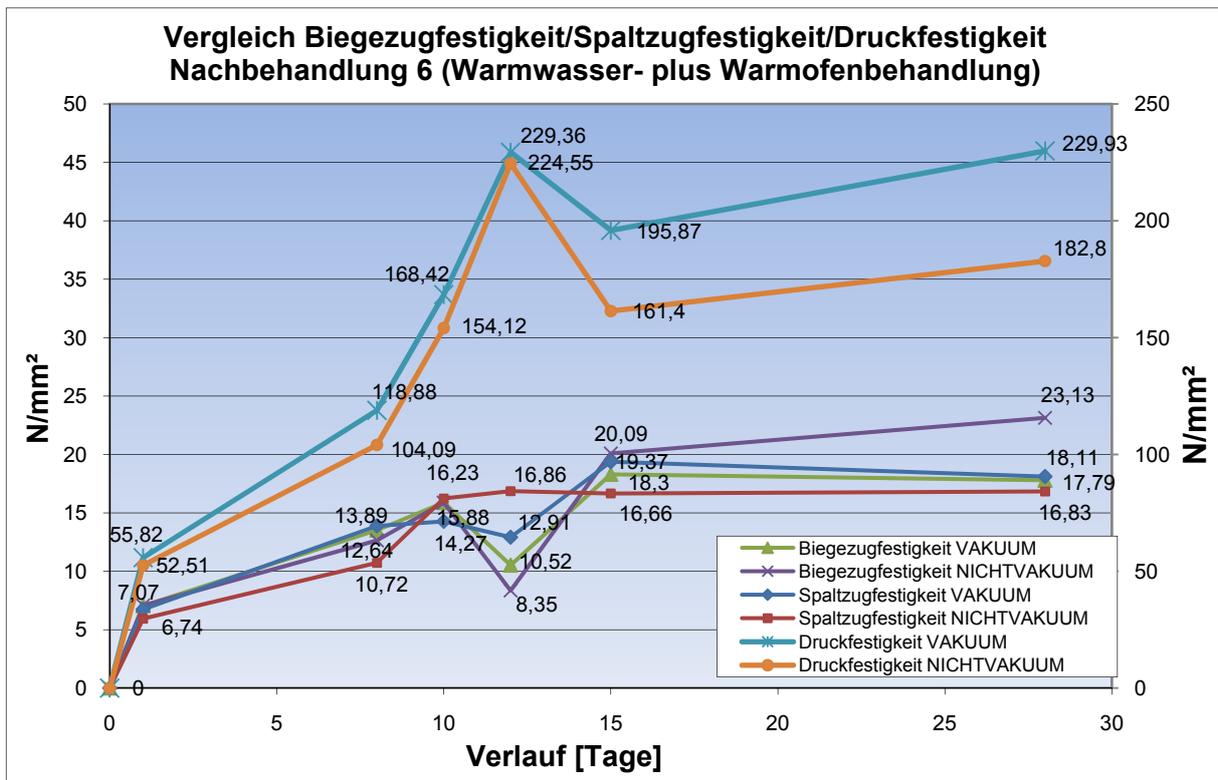


Abbildung 5.56: Vergleich aller Festigkeiten, Nachbehandlung 6 nach Tabelle 3.7

5.6.8 Vergleich der Gesamtporosität mit den Druckfestigkeiten

In Abbildung 5.57 sind zu jeder Nachbehandlungsmethode die Druckfestigkeit und die Gesamtporosität der 28 Tage alten vakuumgemischten Proben eingetragen. Alle Werte verstehen sich als Mittelwert von den jeweils drei Probekörpern.

Die Verläufe der Kurven sind bis zu den Ergebnissen der Nachbehandlung 4 plausibel. Üblicherweise kann man von einer geringen Gesamtporosität auf ein dichteres Gefüge und weiter auf eine höhere Druckfestigkeit schließen. Hier sehen wir, dass die Druckfestigkeiten bei der Nachbehandlung 5 und der Nachbehandlung 6 höher sind als die der anderen Nachbehandlungen, obwohl deren Gesamtporosität gegenüber der Nachbehandlung 1 um 227,3% (Nachbehandlung 5) bzw. um 159,4% (Nachbehandlung 6) höhere Werte erreicht. Einerseits hat die mit der Temperaturbehandlung von über 200°C einhergehende Transformierung eines Teils der Kristallstruktur (siehe Abschnitt 3.8) dem Beton eine enorme Festigkeit verliehen, andererseits führten offensichtlich die hohen Temperaturen ebenfalls dazu, dass vermehrt Poren im Beton zu finden sind. Das lässt darauf schließen, dass man die Nachbehandlungsmethoden 5 und 6 eventuell optimieren könnte, indem man zusätzliche Maßnahmen trifft, die die zusätzliche Porosität verhindert. Diese könnten zum Beispiel längere Abkühlphasen nach den Temperaturbehandlungen oder längere bzw. kürzere Behandlungsdauern sein.

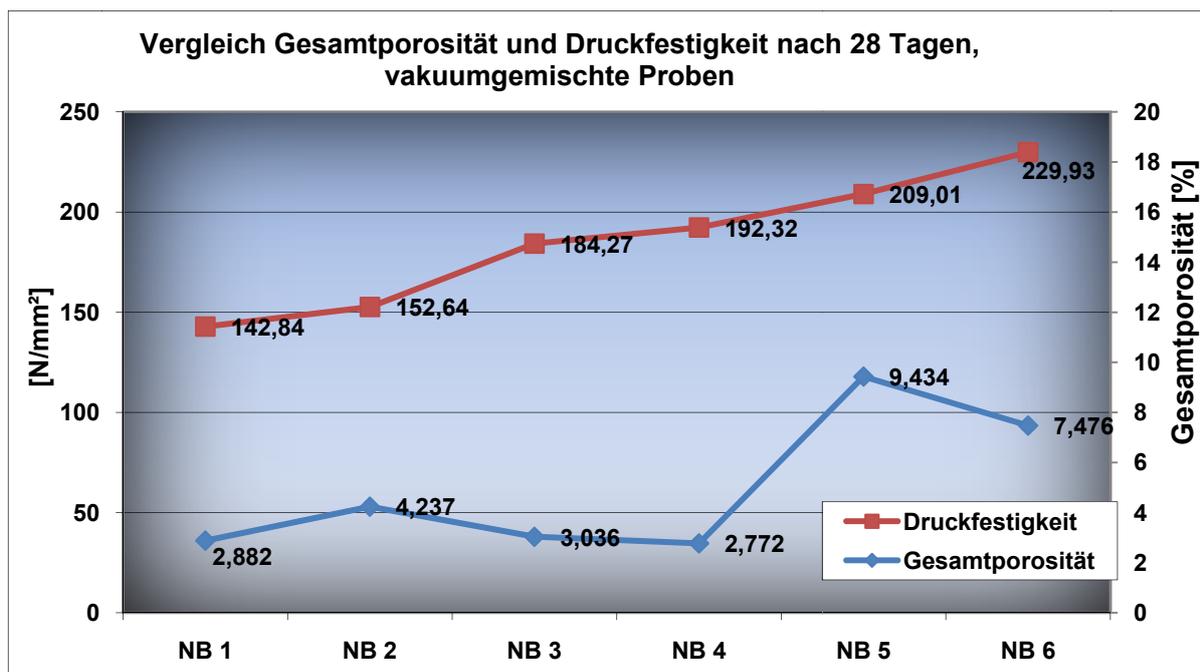


Abbildung 5.57: Vergleich der Gesamtporosität mit der Druckfestigkeit, vakuumgemischte Proben

Abbildung 5.58 zeigt, dass die normalgemischten Proben bezüglich des Zusammenhangs der Porosität und der Druckfestigkeit ähnliche Tendenzen aufweist.

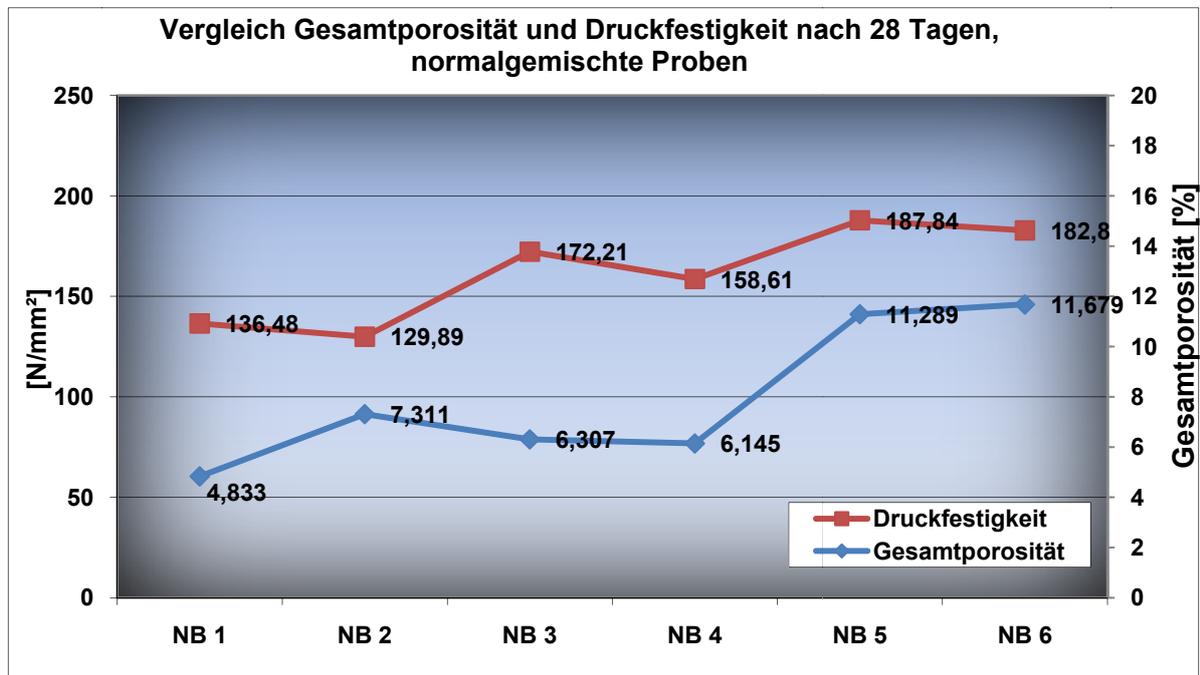


Abbildung 5.58: Vergleich der Gesamtporosität mit der Druckfestigkeit, normalgemischte Proben

5.7 Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Vorversuche 3 und für die Hauptversuche 24 Betonmischungen hergestellt, die zu insgesamt 135 Betonprüfkörper verarbeitet wurden. Diese Mischungen beziehungsweise Prüfprismen wurden jeweils 3 Frischbeton sowie 5 Festbetonprüfungen unterworfen. Diese waren:

- Ausbreitmaß (Frischbeton)
- Luftgehalt (Frischbeton)
- Rohdichte (Frischbeton)
- Rohdichte (Festbeton)
- Biegezugfestigkeit (Festbeton)
- Spaltzugfestigkeit (Festbeton)
- Druckfestigkeit (Festbeton)
- Porosität (Festbeton)

Unmittelbar nach jedem Mischvorgang wurden das Ausbreitmaß, der Luftgehalt und die Frischbetonrohichte ermittelt. Anschließend wurden die Frischbetonmischungen in Schalungen gegossen, um die Betonprobekörper für die anschließenden

Festbetonprüfungen zu erhalten. Die Probekörper wurden in 6 verschiedenen Gruppen eingeteilt, die jeweils einer anderen Nachbehandlung unterzogen wurden. Die 6 Gruppen sind wiederum selbst ebenfalls in 2 Untergruppen eingeteilt, in vakuumgemischte Proben oder normalgemischt Proben.

Die Festbetonprüfungen sind für alle Gruppen am 1.Tag am 15.Tag und am 28.Tag durchgeführt worden. Außerdem ist jede Gruppe für sich an jedem Tag geprüft worden, an dem sich im Zuge ihrer Nachbehandlung die Lagerung der Probekörper geändert hat. Jede Festbetonprüfung ist an jeweils 3 gleichbehandelten Probepismen durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Festbetonprüfungen sind als Mittelwert der 3 Einzelergebnisse zu verstehen.

Für die Ermittlung der Porosität wurden jeweils ca. 1-1,5 g schwere Probestücke mit einem Kernbohrer aus einem von den durch die Biegezugfestigkeitsprüfung zerstörten Prüfkörpern heraus gebohrt.

Die Abbildungen zu den Frischbetonergebnissen zeigen, dass das Ausbreitmaß, ein Maß für die Verarbeitbarkeit, der normalgemischten Frischbetone ausnahmslos höher war als die der mit 60 mbar entlüfteten Betone. Der höchste in dieser Arbeit gemessene Wert war 22,2 cm und der niedrigste 19,5 cm. Im Schnitt waren die Ausbreitmaßmessungen der vakuumgemischten Betone um 7,2% geringer als die der normalgemischten Betone.

Der ermittelte Luftgehalt war stets bei den mit 60mbar entlüfteten Mischungen niedriger. Der niedrigste gemessene Wert lag bei 0,6 Vol.-%, der höchste gemessene Wert lag bei 5,9 Vol.-%. Im Schnitt lagen die Werte des Luftgehalts der vakuumgemischten Betone um 4,82% geringer als die der normalgemischten Betone. Die Ergebnisse mit den höchsten Rohdichten erreichten die vakuumgemischten Betone. Die höchste ermittelte Rohdichte lag bei 2445 kg/m³, die niedrigste normalgemischte bei 2236 kg/m³. Im Schnitt verzeichneten die Rohdichten der vakuumgemischten Frischbetone um 6,6% höhere Werte als die der normalgemischten Betone.

Bei den Ergebnissen der Biegezugfestigkeiten konnten zum Teil große Streuungen bei den Werten der drei immer gleichbehandelten Probekörper beobachtet werden. Dies ist dadurch zu erklären, dass möglicherweise im inneren der Probekörper eingeschlossenen größere Luftporen das Ergebnis einer 3-Punkt-Biegezugprüfung stark verfälschen können. Herstellungsbedingt kann man das Risiko solcher unerwünschten Unregelmäßigkeiten durch möglichst gutes Verdichten beim Schalen

verringern. Prüftechnisch kann man die Streuung der Ergebnisse durch die Verwendung einer 4-Punkt-Biegezugapparatur für die Biegezugprüfungen verringern, die leider aufgrund der geringen Größe der Prüfkörper nicht zur Verfügung stand.

Das mit Abstand höchste Ergebnis in der 28-Tagebiegezugfestigkeit erzielten die normalgemischten Proben der Nachbehandlungsmethode 6 (Warmwasser/Warmofenbehandlung) mit 23,13 N/mm². Interessanterweise lagen in den Ergebnissen aller anderen Nachbehandlungsmethoden die vakuumgemischten Proben voran. Den insgesamt niedrigsten Wert der 28-Tagefestigkeit verzeichneten die normalgemischten Proben der Nachbehandlung 2 (Lagerung an der Raumluft) mit lediglich 12,09 N/mm².

Auffallend ist, wie die Biegezugverläufe (siehe Abbildung 5.45 und Abbildung 5.46) der Nachbehandlungen 3 (Warmwasserlagerung, 90°C) und Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) zeigen, dass die Biegezugfestigkeiten unmittelbar nach Herausnahme aus dem Warmwasserbad einen verhältnismäßig hohen Wert erzielten, jedoch in der Folge wieder stark abfielen. So erreichten die 15- und 28-Tagefestigkeiten der Nachbehandlung 3 nur 76,2% (Nichtvakuum) beziehungsweise nur 81,8% (Vakuum) der Festigkeit unmittelbar nach Herausnahme aus dem Warmwasserbecken (dies geschah am 4.Tag). Die Biegezugfestigkeiten der Proben der Nachbehandlung 6 verzeichneten hingegen am 12.Tag, also 2 Tage nach der Entnahme aus dem Warmwasserbecken und unmittelbar nach Herausnahme aus dem 200°C temperierten Ofen, einen Einbruch. Hier gingen die Biegezugfestigkeiten innerhalb von 2 Tagen um fast 48% (Nichtvakuum) beziehungsweise um 34% (Vakuum) zurück. 4 Tage später jedoch erreichten die Proben wieder verhältnismäßig hohe Biegezugfestigkeiten. So stiegen die Biegezugfestigkeiten der vakuumgemischten Proben wieder um 73,9% (bezogen auf die 12-Tagebiegezugfestigkeiten) und die der normalgemischten Proben gar um 140,5%. In weiterer Folge blieben die Festigkeiten dieser Nachbehandlung auf diesem Niveau oder konnten sogar noch leicht zulegen.

Im Hinblick auf die Frühfestigkeit sind die Ergebnisse der Nachbehandlung 3 (Warmwasserlagerung 90°C) besonders interessant, da bereits am 4. Tag über 100% der 28-Tagebiegezugfestigkeit erreicht wurde. Die Biegezugfestigkeiten der Nachbehandlung 4 (Warmofenbehandlung 1, 90°C) steigen innerhalb von 8 Tagen auf ein relativ hohes Niveau und können dies auch bis zum 28.Tag ohne erkennbare Festigkeitsverluste auch halten. So konnten die Proben der Nachbehandlung 4 mit

19,46 N/mm² in der 15-Tagefestigkeit und mit 18,3 N/mm² in der 28-Tagefestigkeit die besten Ergebnisse aller vakuumgemischten Betone für sich verzeichnen.

Insgesamt kann man sagen, dass die Ergebnisse, im Hinblick auf die Mischtechnik, bei den vakuumgemischten Proben auf einem höheren Niveau lagen, jedoch der absolut höchste Wert an normalgemischten Probepismen zu beobachten war. Im Hinblick auf die Nachbehandlungsmethoden ist es möglich durch die richtigen zeitlichen Dauern und Temperaturen der Wärmebehandlungen die Biegezugfestigkeiten im Vergleich zu unbehandelten oder wassergelagerten Betonen um bis zu 91% zu erhöhen.

Die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeiten unterlagen im Gegensatz zu denen der Biegezugfestigkeiten einer geringeren Streuung (bezogen auf die immer 3 gleichbehandelten Prismen einer Prüferie). Das höchste Ergebnis der 28-Tagefestigkeit mit 18,11 N/mm² erzielten wieder die Proben der Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung), der niedrigste Wert war mit 12,24 N/mm² bei den Proben der Nachbehandlung 2 (Lagerung an der Raumluft) zu verzeichnen.

Ein Blick auf die Ergebnisse der Nachbehandlung 3 (Warmwasserlagerung, 90°C) zeigt starke Ähnlichkeiten zwischen den Verläufen der Biegezugfestigkeiten und den der Spaltzugfestigkeiten. In beiden Fällen wird schon nach 4 Tagen eine relativ hohe Festigkeit erzielt. Jedoch fielen die Spaltzugfestigkeiten in den darauffolgenden Prüfungen nicht so stark ab wie die Biegezugfestigkeiten, beziehungsweise konnten bis zum 28.Tag sogar noch etwas zulegen.

Im Gegensatz dazu sind die Verläufe der Biegezugfestigkeiten und der Spaltzugfestigkeiten der Proben der Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung) zumindest die der normalgemischten Proben sehr unterschiedlich. So bleibt der Festigkeitseinbruch bei den Ergebnissen am 12.Tag im Großen und Ganzen aus. Hier zeigte sich, dass die Spaltzugfestigkeiten der normalgemischten Proben vom 12. bis zum 28.Tag auf einem vergleichbaren Niveau blieben.

Zusammengefasst kommt man im Hinblick auf die Mischtechnik zu dem Ergebnis, dass die vakuumgemischten Proben im Vergleich zu ihren normalgemischten Pendanten allesamt zwischen 7,4% und 36,3% höhere Spaltzugfestigkeiten ergeben. Im Zusammenhang mit der Nachbehandlung kommt man zu dem Schluss, dass durch eine richtige Wärmebehandlung die Spaltzugfestigkeiten, im Vergleich zu den

Ergebnissen von Betonen die entweder an der Luft oder nur unter Wasser gelagert wurden, um bis zu 37,5% erhöht werden können.

Den höchsten Wert der 28-Tagedruckfestigkeit mit 229,93 N/mm² erzielten die vakuumgemischten Proben nach einer Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung), die niedrigste 28-Tagedruckfestigkeit mit 129,89 N/mm² ist den Proben der Nachbehandlung 2 (Lagerung an der Raumluft) zuzuordnen. Interessanterweise ist die absolut höchste Druckfestigkeit die 12-Tagefestigkeit der vakuumgemischten Proben der Nachbehandlung 5 (Warmofenbehandlung, 250°C), unmittelbar nachdem die Proben nach 7 Tagen aus dem Ofen genommen wurden. Anschließend fielen die Ergebnisse bis zum 15.Tag wieder um ca.22% (Vakuum) beziehungsweise um 7% (Nichtvakuum). Bis zum 28.Tag konnten bei den Druckfestigkeitsprüfungen wieder Werte um 210 N/mm² (Vakuum) beziehungsweise um 180 N/mm² (Nichtvakuum) erzielt werden. Ähnlich verhält es sich mit den Druckfestigkeiten der Proben der Nachbehandlung 6 (Warmwasser- plus Warmofenbehandlung). Die höchsten Ergebnisse erzielten die Prismen, die am 12.Tag, nach Entnahme aus dem 200°C Ofen, geprüft wurden. Anschließend ist am 15.Tag ein Festigkeitseinbruch zu verzeichnen, bei dem die normalgemischten um ca.30% und die vakuumgemischten Proben um etwa 14 % geringere Festigkeiten erreichten. Am 28.Tag zeigten die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen wieder Werte um die 230 N/mm² (Vakuum) beziehungsweise um die 187 N/mm² (Nichtvakuum).

Im Endeffekt ist ersichtlich, dass bei den Druckfestigkeiten ebenfalls die vakuumgemischten Proben zwischen 4,6% und 25,7% höhere Ergebnisse erzielten als ihre jeweiligen normalgemischten Vergleichsproben. Im Zusammenhang mit der Nachbehandlung kommt man zu der Einsicht, dass durch eine richtige Wärmebehandlung die Druckfestigkeiten, im Vergleich zu den Ergebnissen von Betonen die entweder an der Luft oder nur unter Wasser gelagert wurden, um bis zu 61% erhöht werden können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Einflüsse eines Vakuums von 60mbar während der letzten Mischphase im Betonmischer in Verbindung mit unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Frisch- und Festbetoneigenschaften von ultrahochfesten Betonen. Es galt zu untersuchen, inwieweit thermische Nachbehandlungen innerhalb von 28 Tagen die Eigenschaften von vakuumgemischtem Beton beeinflussen, beziehungsweise verbessern können. Zu diesem Zweck wurden für Versuche UHPC-Probepismen von 160x40x40 mm hergestellt, deren Betonrezeptur wie folgt festgelegt wurde:

- 194,45 kg/m³ Wasser
- 700,00 kg/m³ Zement
- 140,00 kg/m³ Microsilica
- 49,00 kg/m³ Fließmittel
- 1268 kg/m³ Zuschläge

Die veränderlichen Parameter der Mischvorgänge waren

- Unterschiedliche Unterdrücke in der Endphase des Mischvorgangs (Umgebungsdruck und 60mbar für 2 min 40 sec)

Nach jedem der insgesamt 24 Mischvorgänge wurden die folgenden Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Ermittlung des Ausbreitmaß
- Ermittlung des Frischbetonluftgehalts
- Ermittlung der Frischbetonrohddichte

Die unterschiedlichen Nachbehandlungen vom 1. bis zum 28.Tag nach dem Ausschalen waren:

- Nachbehandlung in Anlehnung an die ÖNORM EN B3303
- Nachbehandlung durch Lagerung an der Raumluft bei ca. 20°C
- Nachbehandlung durch Lagerung vom 2. bis zum 4.Tag in einem Warmwasserbecken bei 90°C, dann an Raumluft bis zum 28.Tag
- Nachbehandlung durch Lagerung vom 4. bis zum 8.Tag in einem Ofen bei 90°C, dann an Raumluft bis zum 28.Tag

- Nachbehandlung durch Lagerung vom 1. bis zum 8.Tag in Wasser bei Raumtemperatur, vom 8. bis zum 10. Tag in einem Warmwasserbecken bei 90°C, anschließend Lagerung vom 10. bis zum 12.Tag in einem Ofen bei 200°C, dann Lagerung in Wasser bei Raumtemperatur bis zum 28.Tag.
- Nachbehandlung durch Lagerung vom 4. bis zum 12. Tag in einem Ofen bei 250°C, dann an Raumluft bis zum 28.Tag

Für alle Probekörper, unabhängig welcher Nachbehandlung dieser unterzogen wurden, sind am 1.Tag am 15.Tag und am 28.Tag Festbetonprüfungen durchgeführt worden. Zusätzlich wurden Probekörper an jedem Tag geprüft an dem sich die Lagerungsbedingungen im Zuge ihrer Nachbehandlung geändert haben. Es wurden folgende Festbetonprüfungen durchgeführt:

- Ermittlung der Festbetonrohddichte
- Biegezugfestigkeitsprüfung
- Spaltzugfestigkeitsprüfung
- Druckfestigkeitsprüfung
- Quecksilberporosimetrie (Ausschließlich an 28 Tage alten Proben)

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

Es wurde gezeigt, dass mit wenigen Ausnahmen immer die vakuumgemischten Proben sowohl bei den Druckfestigkeiten als auch bei den Biegezug- und Spaltzugfestigkeiten höhere Ergebnisse erzielten, unabhängig von der Nachbehandlung.

Bei Auswertung der Ergebnisse, im Zusammenhang mit der erfolgten Nachbehandlung, wurde festgestellt, dass abgesehen von wenigen Ausnahmen die Festigkeiten der Proben, die einer thermischen Nachbehandlung unterworfen waren, höhere Werte in der 28-Tagefestigkeit erzielten, als solche ohne thermische Nachbehandlung.

Es stellte sich weiterhin heraus, dass sich die Vorteile des Vakuummischens und der thermischen Nachbehandlungen weder gegenseitig verstärken noch sich gegenseitig aufheben. Die Vorteile werden sozusagen in den Ergebnissen der Festigkeitsprüfungen aufsummiert.

Grob zusammengefasst kann man sagen, dass durch das Aufbringen eines Unterdrucks von 60mbar während der letzten Mischphase, die Festigkeiten der Proben um 4 bis 30% erhöht werden konnten.

Zusätzlich konnten die Festigkeiten durch eine thermische Nachbehandlung im Vergleich zu den Proben, die nicht oder nur mit raumtemperierten Wasser behandelt wurden, um bis zu 95% erhöht werden.

6.2 Ausblick

Da das Fassungsvermögen des zur Verfügung stehenden Mixers vergleichsweise klein ist, um alle größere Probemengen mit einer Mischung herzustellen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass geringe Unterschiede im Mischprozedere Auswirkungen auf die Ergebnisse hatten. Um dieses auszuschließen, müsste man einen Mischer mit größerem Volumen einsetzen. Dieses ist jedoch nur möglich, wenn man auf die Vakuumbehandlung verzichtet.

Der untersuchte ultrahochfeste Beton, besonders der der thermisch nachbehandelt wurde, zeigte in den mechanischen Bruchversuchen ein schlagartiges sprödes Versagen und im Vergleich zu den Druckfestigkeiten geringe Zugfestigkeiten. In weiterer Folge wäre es deshalb interessant, wie sich die Vakuummischtechnik im Zusammenhang mit verschiedenen Nachbehandlungsmethoden auf faserverstärkten ultrahochfesten Beton auswirkt. Um eine höhere Duktilität und höhere Zugfestigkeiten zu erreichen, ist eine Beimischung von Fasern, sei es aus Stahl oder aus Polypropylen, notwendig.

Überdies wären weiterführende Versuche notwendig, um die variablen Parameter der thermischen Nachbehandlungen zu optimieren. Die Hg-Porosimeter-Versuche haben gezeigt, dass vor allem bei den thermischen Behandlungen mit Temperaturen über 200°C Verbesserungen bezüglich der Behandlungstemperatur, der Aufheiz- bzw. Abkühlraten und der Behandlungsdauer notwendig sind, um die Bildung von Poren mit größeren Durchmessern und/oder Mikrorisse zu verhindern.

Selbstverständlich wäre es auch von großem Interesse die in dieser Arbeit verwendete Mischrezeptur u.a. bezüglich der Korngrößenverteilungen zu optimieren, um eine optimale Packungsdichte und Homogenisierung im Beton zu erreichen.

7 Summary

The objective of this master thesis is the investigation of the influence of vacuum curing during the last phase of mixing in combination of several selected curing methods on ultra-high-performance concrete (UHPC). This type of concrete is characterized by its homogeneous structure and special production which leads to its extensive compressive and tensile.

To determine the effects of different curing methods on the properties of fresh and hardened UHPC, a large number of laboratory experiments was performed. In these tests there have been compared 2x6 different cured concretes (6 curing methods, 2 ways of mixing the concrete) by its fresh concrete properties (slump test, air filled pore and bulk density) and hardened properties (compressive strength, bending tensile strength, splitting tensile strength and Hg-Porosimetry).

The experimental results showed, that not only the single components of the concrete, but also the way the concrete is assembled, mixed and cured has considerably influence on the performance of UHPC. In order to be capable of using the whole advantage of hardened UHPC it is essential not only to optimize the mix design, but also to focus on the production process itself, including the treatment of the concrete during the hardening-phase.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Rümmelin, T. A., *Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfestem Beton-Fachhochschule Stuttgart*, S.12-16. Stuttgart, 2005
- [2] Schneider, U., *Bindemittel-Wiener Baustofflehre Blätter 17.Auflage-TU Wien*. Wien, 2001
- [3] Schneider, U. und Horvath, J., *Herstellung und Eigenschaften von ultrahochfestem Beton Heft 8-TU Wien*, S.5-12. Wien, 2003
- [4] Schneider, U. und Horvath, J., *Wiener Baustofflehreblätter-Sondergebiete der Werkstoffe im Bauwesen-TU Wien*. Wien, 2003
- [5] Treachi, Gianni., *Beton und Schalung*. 2005.
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/Sieblinie>. [15.06.2009.]
- [7] Horvath, J., *Entwicklung von hochfestem Blähglasbeton-TU Wien*. Wien, 1998
- [8] Berger, M., *Einfluss des Vakuummischprozesses auf ausgewählte Eigenschaften von ultrahochfestem Beton-TU Wien*. Wien, 2008
- [9] König, R. und Wagner, P. J., *Mikrosilika, Handbuch der Firma Woermann*. 2000
- [10] Droll, K., *Einfluss von Zusatzstoffen auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von UHFB, S.25-44*. 2003.
- [11] Schneider, U. und Horvath, J., *Herstellung und Eigenschaften von Ultrahochleistungsbetonen Heft 8-TU Wien*, S.14. Wien, 2003
- [12] Holschemacher, K. und Dehn, F., *Faserbeton- ein innovativer Baustoff auf dem Weg in die Zukunft, S1-18. Faserbeton, Innovationen im Bauwesen*. 2002.
- [13] Gay, M. und Kleen, E., *Zusatzmittel für Ultrahochleistungsbeton, S.45-53*. 2003.
- [14] Richard, P. und Cheyrezy, M. H., *Composition of reactive powder concretes*, Cement and Concrete Research. 1995.
- [15] Stark, J. und Möser, B., *Zement und Kalk, Der Baustoff als Werkstoff*. Basel, 2000.
- [16] Thomas, A., *Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, S.9*. 2006.
- [17] Schindler, A. K., *Concrete hydration, temperature development and setting at early ages*;. Austin, Texas : s.n., 2002.
- [18] Thomas, A., *Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, S.10*. 2006.
- [19] Thomas, A., *Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, S.21*. 2006.

- [20] Jonasson, J. E., *Slip form construction- calculation for assessing protection against early freezing*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, No. 4 : s.n., 1984.
- [21] Laub, M., *Werkstoffmodell zur Berechnung von Temperaturspannungen in massigen Bauteilen im jungen Alter- TU Braunschweig*. Braunschweig, 1990.
- [22] Gutsch, A. W., *Stoffeigenschaften des jungen Betons - Versuche und Modelle, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 495*. 1999.
- [23] Rümmelin, T. A., *Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfestem Beton, S.25*. 2005.
- [24] Schneider, U., Diedrichs, U und Horvath, J., *Zum Abplatzverhalten von Hochleistungsbetonen unter Brandangriff, Heft 7, S.49-50.-Tu Wien*. Wien, 2001.
- [25] Schmidt, M. und Fehling, E., *Ultra-Hochfester Beton, Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 2*. Kassel University : s.n., 2003.
- [26] Rümmelin, T. A., *Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfestem Beton, S.26*. 2005.
- [27] <http://cms.uni-kassel.de/unicms>. [2009.04.21.]
- [28] <http://www.gaertnerplatzlbrücke.de>. [2009.04.21.]
- [29] Fehling, E., Schmidt, M. und Teichmann, T., *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultrahochfester Betone, S. 121. Forschungsbericht DFG FE 497/1-1*. 2005.
- [30] <http://www.baunetzwissen.de>. [2009. 05. 2009.]
- [31] <http://www.eirich.de/>. Homepage der Fa. Eirich. [16.05.2009]
- [32] Betontechnologen, Symposium "Mischen-Steuern-Protokollieren" für Hochschulen, *Der definierte Mischprozess*. 2005.
- [33] <http://de.wikipedia.org/wiki/vakuum>. [20.05.2009]
- [34] <http://www.sterlingsihi.com/cms/de/England/startseite/produkte-und-service/vakuumpumpen.html>. Fa. Sterling. [22.05.2009]
- [35] <http://de.wikipedia.org/wiki/Flüssigkeitsringpumpen>. [22. 05.2009]
- [36] Schachinger, A., I., *Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S.57*. 2007.
- [37] <http://www.lafarge.at/>. [24.05.2009]
- [38] <http://www.quarzit.at/fei-main.php?page=anwendung&sn=2&ban=produkte>. Fa. Quarzit-Sandwerke Feichtinger Ges.m.b.H. [29.05.2009.]
-

- [39] <http://www.materials.elkem.com/>. Fa. Elkem. [29.05.2009.]
- [40] <http://www.betontechnik.at/index.php?seitenId=4&produktkatalogAnsicht>.
[Online] Fa. Betontechnik G.m.b.H. [Zitat vom: 30.05.2009.]
- [41] *Prüfverfahren; Deutsche Fassung prEN 459-2:2008*. 2008.
- [42] <http://webmineral.com/data/Tobermorite.shtml>. [20.09.2009.]
- [43] <http://webmineral.com/data/Xonotlite.shtml>. [20.09.2009.]
- [44] E., Fehling, M., Schmidt und S., Stürwald., *UHPC KASSEL HEFT 10: Ultra High Performance Concrete (UHPC), S.216-217- Universität Kassel*. Kassel, 2008.
- [45] E., Fehling und M., Schmidt., *UHPC KASSEL HEFT 7: Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Entwicklung an der Universität Kassel, S.233-234.- Universität Kassel*. Kassel, 2007.
- [46] M., Schmidt, E., Fehling und C., Geisenhanslücke., *UHPC KASSEL HEFT 3: Ultra High Performance Concrete (UHPC), S.151-152.-Universität Kassel*. Kassel, 2004.
- [47] <http://www.zwick.de>. Fa. Zwick. [11.06.2009.]
- [48] *ÖNORM EN 12390-6:2000, Spaltzugfestigkeitsprüfung*. 2000.
- [49] *ÖNORM EN 196-1, Prüfverfahren für Zement, Teil 1*. 2005.
- [50] *Porotec Bedienungsanleitung Pascal 140 240 440, S.20*. 2001.