

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/
Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

<http://www.ub.tuwien.ac.at>



The approved original version of this diploma or
master thesis is available at the main library of the
Vienna University of Technology.

<http://www.ub.tuwien.ac.at/eng>

DIPLOMARBEIT Master Thesis

Sachstandsbericht zu ultrahochfesten Betonen und Feuerbetonen unter besonderer Berücksichtigung der Festigkeitssteigerungen

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

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr. techn. Elemer Bölcskey
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Kirnbauer
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinrich Bruckner

E206

Institut für Hochbau und Technologien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Arch. Dipl.-Ing. Marie-Luise Toms, MSc

Matrikelnummer 9926636

1030 Wien

Wien, am 2. Oktober 2013

eigenhändige Unterschrift

Kurzfassung

Ultra High Performance Concrete (UHPC) weist eine – im Vergleich zu konventionellen Betonen – sehr hohe Druckfestigkeit ($> 150 \text{ N/mm}^2$) und eine besonders hohe Widerstandsfähigkeit gegen physikalischen und chemischen Angriff auf. Durch unterschiedlichste Ansätze wie durch Optimieren der Packungsdichte, durch eine höhere Homogenität des Gefüges, durch eine verringerte Porosität oder durch Reduzieren des Größtkornanteils konnten diese Eigenschaften signifikant verbessert werden.

Feuerbetone werden vorwiegend in Anlagen der Grundstoffindustrie sehr hohen Temperaturen (etwa 600°C bis 2000°C) ausgesetzt. Dabei erfahren sie massive mechanische Belastungen wie Abrieb und Druck. Feuerbetone weisen im Allgemeinen (Grün-)Festigkeiten im Bereich hochfester Betone (70 bis 150 N/mm^2) auf. Die Kaltdruckfestigkeiten bei Temperaturbeanspruchungen um 800°C sind geringer. Aufgrund der hohen Festigkeitsanforderungen an Feuerbetone zeigt diese Arbeit Möglichkeiten auf, mit Hilfe des Wissens aus der Ultrahochleistungsbetontechnologie eine Verbesserung der Festigkeiten von Feuerbetonen zu erreichen ohne dabei die bestehenden Eigenschaften wie Schlackenresistenz oder Temperaturwechselbeständigkeit zu beeinträchtigen.

In einer umfangreichen Recherche und experimentellen Versuchsreihen wurden erstmals die Parallelen sowie die Widersprüche von Feuerbetonen zu ultrahochfesten Betonen aufgezeigt, die letztendlich einen Weg zur Optimierung des Werkstoffes Feuerbeton aufzeigen sollen. Neben den Kaltdruck- und Kaltbiegefestigkeiten wurden im Rahmen der Versuchsreihe auch die Kornverteilungen und die Porosität des vorliegenden Feuerbetons untersucht und analysiert.

Abstract

Ultra High Performance Concrete (UHPC) has – compared to conventional concretes – an especially high crushing strength ($> 150 \text{ N/mm}^2$) and is very resistant to physical and chemical attacks. It has been possible to significantly improve these characteristics by optimizing the packing density, increasing the structure's homogeneity and reducing porosity as well as the amount of large-sized aggregates.

Refractory castables are exposed to very high temperatures (about 600°C to 2000°C), especially in primary-industry plants, and, therefore, experiences massive mechanical stress such as abrasion and pressure. In general, refractory castable has the same (green) strength as high performance concrete (70 to 150 N/mm^2). The cold crushing strength is lower at temperatures around 800°C . Due to the high strength requirements of refractory castables, this paper, by means of the knowledge of ultra-high performance concrete technology, identifies options to achieve a strength improvement of this type of castable without affecting properties such as slag resistance or thermal shock resistance.

Comprehensive research and a series of experimental tests have highlighted, for the first time, the parallels and contradictions between refractory castables and Ultra High Performance Concrete that, in the end, indicate a way to optimize refractory castables. Not only did the experimental tests examine and analyze the cold crushing and cold tensile bending strength levels of the refractory castable present, but also its aggregate size distribution and porosity.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
1 Einleitung.....	8
2 Ultra-High-Performance-Concrete	10
2.1 Allgemeines	10
2.2 Anwendungsbereich.....	11
2.3 Zusammensetzung.....	15
2.3.1 5-Stoff-System	15
2.3.1.1 Zement.....	16
2.3.1.2 Wasser	18
2.3.1.3 Zuschläge	18
2.3.1.4 Zusatzstoffe	19
2.3.1.5 Zusatzmittel	20
2.3.1.6 Fasern	20
2.4 Der Mischprozess	21
2.4.1 Mischtechnik	21
2.4.2 Mischablauf, Mischdauer und Mischreihenfolge.....	22
2.4.3 Mischwerkzeuge.....	22
2.4.4 Die Verarbeitung und Nachbehandlung.....	23
2.4.5 Das Erhärten	23
2.5 Mechanische Eigenschaften	24
2.5.1 W/Z-Wert	24
2.5.2 W/B-Wert	25
2.5.3 Wasser/Feststoff-Wert.....	26
2.5.4 Druckfestigkeit.....	28
2.5.5 Biegezugfestigkeit.....	28

2.5.6	Elastizitätsmodul	28
2.6	UHPC unter Temperatureinwirkung/Hochtemperaturverhalten von UHPC.....	28
2.6.1	Chemische Vorgänge	30
2.6.2	Temperaturabhängige Druckfestigkeitsentwicklung von UHPC	31
2.6.3	Thermomechanische Prozesse	32
2.6.4	Thermohydraulische Prozesse.....	33
2.7	Granulometrische Eigenschaften von UHPC	35
2.7.1	Allgemein.....	35
2.7.2	Porosität	35
2.7.3	Packungsdichte.....	37
3	Feuerfeste Werkstoffe	39
3.1	Allgemein.....	39
3.2	Anwendungsbereich.....	39
3.3	Technologie feuerfester Betone.....	41
3.3.1	Einleitung.....	41
3.3.2	Zusammensetzung.....	44
3.3.2.1	Zuschläge	45
3.3.2.2	Bindemittel (u.a. Zement)	50
3.3.2.3	Zusatzstoffe	51
3.3.2.4	Zusatzmittel	51
3.3.2.5	Wasser	51
3.3.2.6	Fasern	52
3.4	Der Mischprozess	54
3.4.1	Herstellung in der Produktion	54
3.4.2	Verarbeitung auf der Baustelle	54
3.4.3	Fertigteile	56
3.4.4	Aufheizprozess	56
3.5	Eigenschaften von Feuerbetonen	57

3.5.1	Mechanische Eigenschaften	58
3.5.1.1	Kaltfestigkeit	58
3.5.1.2	Heißfestigkeit.....	60
3.5.1.3	Abriebbeständigkeit	61
3.5.1.4	Druckerweichen und Druckfließen.....	61
3.5.1.5	Elastizitätsmodul	62
3.5.2	Temperaturwechselbeständigkeit.....	63
3.5.3	Gasdurchlässigkeit.....	64
3.5.4	Granulometrische Eigenschaften von Feuerbetonen	65
3.5.4.1	Porosität	65
3.5.4.2	Packungsdichte.....	67
4	Versuchsvorbereitung und Vorversuche.....	68
4.1	Einleitung.....	68
4.2	Aufbau und Ablauf.....	68
4.2.1	Überblick	68
4.2.2	Voruntersuchungen.....	68
4.2.3	Charakterisierung der Rohstoffe und des Referenzbetons	69
4.2.3.1	Clayrac	69
4.2.3.2	Edelkorund ALODUR®	72
4.2.3.3	Silubit FB 10	73
4.2.3.4	Trinatriumzitat	75
4.2.3.5	SECAR 71®	76
4.2.4	Kornaufbau der einzelnen Rohstoffe	78
5	Versuchsdurchführung und Auswertung	80
5.1	Einleitung/Versuchsaufbau	80
5.2	Anforderungen an den neuen Beton	80
5.3	Untersuchungen des Referenzbetons	80
5.3.1	Allgemeine Angaben zum Referenzbeton.....	80

5.3.2	Verwendete Normen	81
5.3.3	Angaben zur Versuchsdurchführung	81
5.3.3.1	Probenbezeichnungen	81
5.3.3.2	Probenherstellung	82
5.3.3.3	Verdichten	82
5.3.3.4	Probennachbehandlung	82
5.3.3.5	Aufheizprozess	83
5.3.3.6	Hergestellte und untersuchte Proben	83
5.4	Festigkeitsprüfungen	84
5.4.1	Verfahren und Prüfvorschriften	84
5.4.2	Druckfestigkeiten - Ergebnisse	86
5.4.3	Zugfestigkeiten – Ergebnisse	88
5.4.4	Interpretation	90
5.5	Porosität	90
5.5.1	Messverfahren und Prüfvorschriften	90
5.5.2	Porosimetrie – Ergebnisse und Interpretation	91
5.6	Ansätze zur Festigkeitssteigerung	96
6	Zusammenfassung und Ausblick	98
7	Tabellenverzeichnis	100
8	Abbildungsverzeichnis	101
9	Formelverzeichnis	104
10	Literaturverzeichnis	105

1 Einleitung

Hintergrund

Die Entwicklung und Verbesserung ultrahochfester Betone (UHPC) ist besonders in den letzten Jahrzehnten von innovativen Unternehmen und Instituten vorangetrieben worden. Vor allem im Bereich des Tunnel-, Hochhaus- und Brückenbaus kommt es vermehrt zur Verwendung von UHPC. Die hohen Festigkeiten (150 bis 250 N/mm² und höher)¹, die einem UHPC abverlangt werden, kann man vorwiegend durch ein homogenes, dichtes und praktisch von Luftporen befreites Gefüge erreichen. Durch die Verwendung von sogenannten Mikrosilika als Betonzusatzstoff und das Beifügen hochwirksamer PCE-Fließmittel, kann Beton Festigkeiten erreichen, die jene vom Stahl überschreiten und zusätzlich den meisten betonschädigenden Angriffen widerstehen (1).

Feuerbetone weisen im Allgemeinen bereits recht hohe (Grün-)Festigkeiten auf, die im Bereich hochfester Betone (70 bis 150 N/mm²) liegen. Jedoch die Kaltdruckfestigkeiten bei Temperaturbeanspruchungen um 800°C sind im Vergleich wesentlich geringer. Aufgrund ihrer Einsatzbereiche sind für Feuerbetone sehr hohe Festigkeiten in diesem Temperaturbereich unumgänglich und notwendig. Diese Anforderung an den Baustoff wirft die Frage auf, ob eine Möglichkeit besteht mit Hilfe des Wissens aus der UHPC-Technologie die Festigkeiten von Feuerbetonen zu steigern ohne dabei die bestehenden Eigenschaften wie Schlackenresistenz oder Temperaturwechselbeständigkeit zu beeinträchtigen.

Ziel und Aufgabe der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, mit dem Wissen aus der Ultrahochleistungsbetontechnologie Möglichkeiten einer Weiterentwicklung mit Fokus auf die Festigkeitssteigerung von Feuerbetonen abzuwägen und aufzuzeigen. Die Arbeit soll mittels theoretischer Recherche und experimenteller Versuche sowohl Parallelen als auch Widersprüche aufzeigen, die zu einer Optimierung des Werkstoffes Feuerbeton führen könnten.

Aufbau der Arbeit

Im ersten Schritt wird im theoretischen Teil auf Basis des derzeitigen Stands der Technik auf die Werkstoffe UHPC und Feuerbeton eingegangen. Um eine Gegenüberstellung der beiden in der Praxis sehr unterschiedlich eingesetzten Werkstoffe zu ermöglichen, muss zuerst jeweils auf die

¹ In der Literatur wird von 800 N/mm² gesprochen, wobei es sich noch um keinen baupraktisch realisierbaren Wert handeln dürfte. (74)

Zusammensetzung der Ausgangsstoffe der Mischungen, den Mischprozess und die Eigenschaften eingegangen (siehe Bild 1.1).

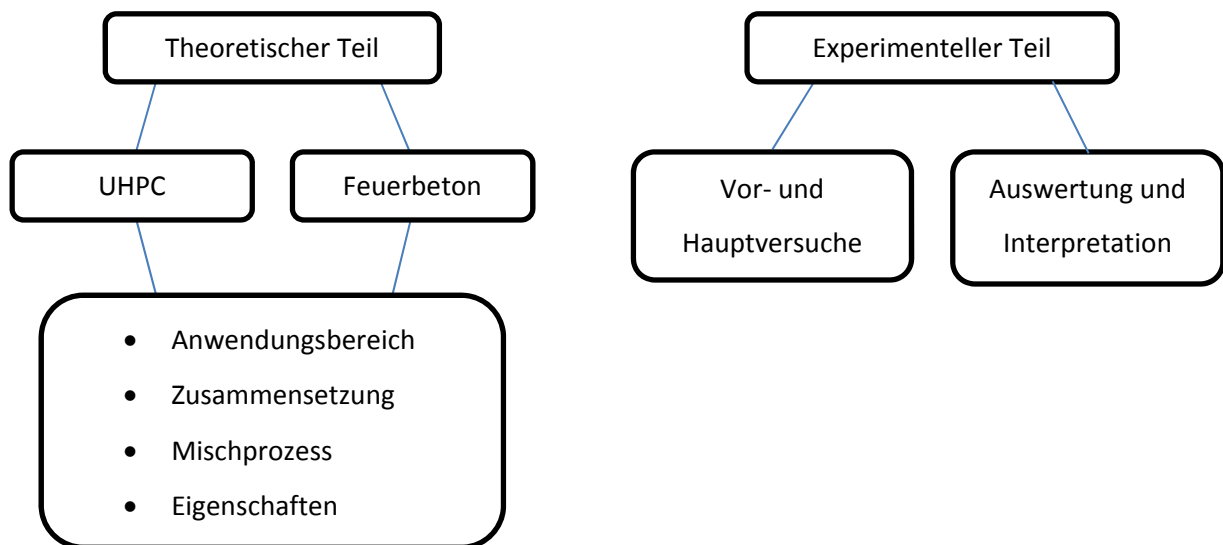


Bild 1.1: Aufbau der Arbeit

Der zweite Teil setzt sich aus den Vor- und Hauptversuchen sowie der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse zusammen. Dabei werden im Zuge der Vorversuche die Ausgangsstoffe des Referenzbetons, die vom Fördergeber zur Verfügung gestellt wurden, eingehend analysiert und geprüft. Den Hauptteil der Versuchsreihen stellt der Referenzbeton dar sowie Ansätze zu dessen Optimierung.

2 Ultra-High-Performance-Concrete

Betrachtet werden neben den allgemeinen Anwendungsbereichen jene Charakteristika von UHPC, die im Weiteren für die Anwendung von Feuerfestbetonen von Bedeutung sind.

2.1 Allgemeines

Als Ultra-High-Performance-Concrete (UHPC), im Deutschen auch ultrahochfester Beton (UHFB) oder Hochleistungsbeton, werden Betone mit Druckfestigkeiten von über 150 N/mm^2 bezeichnet. UHPC steht in der Fachwelt im Allgemeinen im Vergleich zum „regulären“ Beton für acht verbesserte Eigenschaften: Frost- und Taubeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Abriebfestigkeit, Beständigkeit gegen Chloridangriff, Druckfestigkeit, E-Modul, Schwinden und Kriechen. In der Literatur werden die Vorteile noch durch Aspekte wie schlankeres Design bei Tragwerken, längere Dauerhaftigkeit, geringerer Erhaltungsaufwand sowie eine verbesserte Erdbebensicherheit ergänzt (2 S. 5) (3).

Bereits vor Jahrzehnten erkannte man, dass Beton aus dem herkömmlichen 3-Stoff-System mit Zement, Wasser und Sand bzw. Gesteinskörnungen in seiner Leistungsfähigkeit beschränkt ist. Die Erweiterung zum 5-Stoff-System durch Hinzufügen von Betonzusatzmittel und feinsten Zuschläge führte zu einem besonders dichten Gefüge. Ein Größtkorn von weniger als 1 mm leistet einen wesentlichen Beitrag für die Erhöhung der Druckfestigkeiten.

Im Allgemeinen sind folgende Aspekte für die Steigerung der Druck und Zugfestigkeit des UHPCs ausschlaggebend (4) (5) (6) (7) (8):

- 1) die höhere Homogenität durch entsprechende Nachbehandlung und Mischtechnik während der Verarbeitung,
- 2) die Packungsdichte durch Optimierung der Sieblinie: Bei Beachtung der Kornzusammensetzung des Feinstkorns und des Grobzuschlages ergeben sich eine niedrigere Porosität und ein geringer W/Z-Wert.
- 3) der niedrige Wasser/Zement-Wert von weniger als 0,25 bewirkt, dass eine geringe Porosität und Kapillarporenbildung erreicht wird. Wie in Bild 2.1 dargestellt ist, steigt die Druckfestigkeit bei Reduktion des W/Z-Wertes markant.

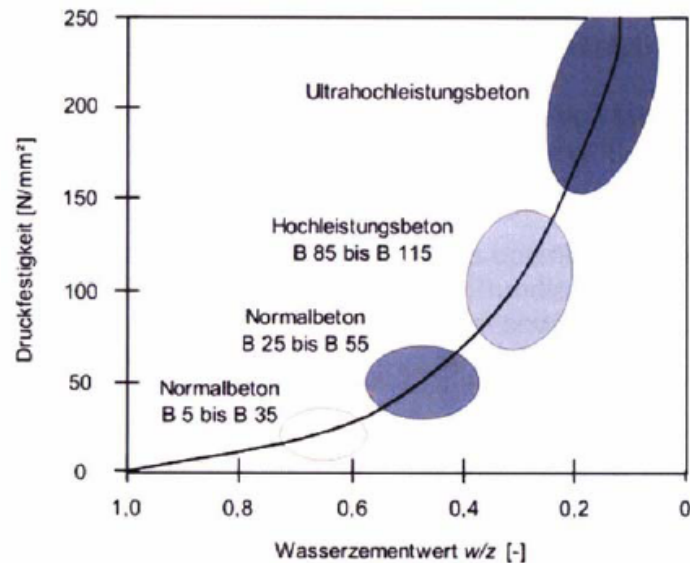


Bild 2.1: Betondruckfestigkeiten in Abhängigkeit des W/Z-Wertes im Vergleich (8 S. 2)

- 4) der geringe Wasser/Bindemittel-Wert, der bei normalem Beton bei 0,45 und bei UHPC bei 0,14 liegt.
- 5) das Beimengen von Silikastaub: Mikrosilika oder Nanosilika werden als Zuschläge hinzugefügt und dienen als Füllstoff sowie Auslöser puzzolanischer Reaktionen. Dadurch kann die Packungsdichte wesentlich erhöht, die Homogenität des Zementleims sowie der Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung verbessert werden, sowie die Festigkeit gesteigert werden.

Um eine einfachere Verarbeitung zu gewährleisten, werden hochleistungsfähige Fließmittel aus Polycaroxylaten oder Polycarboxylatethern beigelegt (4 S. 5) (1) (8).

In dem vorliegenden Kapitel wird nach den Anwendungsbereichen auf die Zusammensetzung von UHPC, den Mischprozess die mechanischen Eigenschaften, sowie das Temperaturverhalten und den granulometrischen Eigenschaften von ultrahochfesten Betonen eingegangen.

2.2 Anwendungsbereich

Die ersten Entwicklungen zu ultrahochfesten Betonen in der Literatur werden in den 1970er Jahren in den USA angeführt. So erreichten erste hochfeste Zementleime Druckfestigkeiten von bis zu 440 N/mm² (6 S. 4). Die wesentlichen Entwicklungen zu Hochleistungsbetonen wurden jedoch in Frankreich vorangetrieben (8 S. 51). Weltweit werden seit den 1980er Jahren Hochleistungsbetone eingesetzt (4 S. 56). In Bild 2.2 werden die wesentlichen technischen Entwicklungen der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts dargestellt.

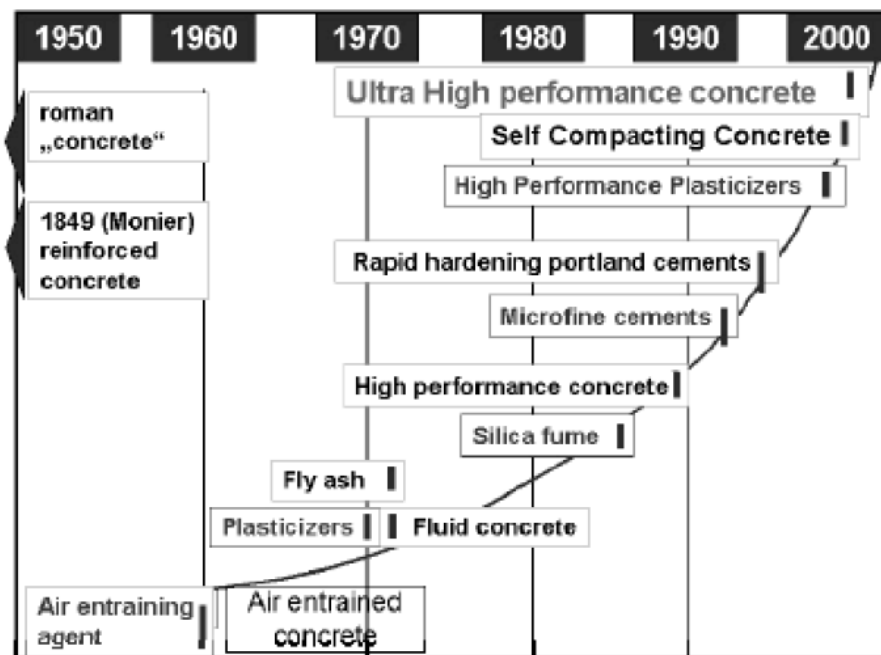


Bild 2.2: Wesentliche Entwicklungen in der Betontechnologie im 20. Jahrhundert (2 S. 99)

Im Allgemeinen führt die Weiterentwicklung konventioneller Betone zu Betonen mit Druckfestigkeiten von über 150 N/mm². Dies entspricht dem Bereich der Fließgrenze von Stahl, was dazu führt, dass Baustahl und Aluminium vermehrt bei Druckbeanspruchung durch UHPC ersetzt werden können (9) (4 S. 45). Aufgrund der sehr hohen Festigkeiten und dem vergleichsweise geringem Gewicht kommt schon heute bei Tragwerken mit hohen Spannweiten und Bauhöhen der Baustoff UHPC zum Einsatz (1 S. 287).

Mögliche Einsatzbereiche für UHPC sind vor allem:

- stark auf Druck belastete Konstruktionselemente (z.B. Stützen aus UHPC oder Stahlummantelungen)
- Wolkenkratzer
- Bauwerke mit grossen Spannweiten (z.B. Brücken, Überdachungen)
- Bauteile für hoch beanspruchte Tragwerksbereiche zur Erhöhung des Durchstanzwiderstandes
- Tunnelbau
- Ersatzelemente von Stahlkonstruktionen (z.B. durch Verwendung faserbewehrter Knotenausbildungen aus UHPC)
- Rohrleitungen
- Decken und Verkehrswegen im industriellen Bereich

- Fertigteile für filigrane Tragwerke mit großen Spannweiten
- Verbundstützen und –träger (Stahl-Beton-Hybridkonstruktionen) (1 S. 372) (4 S. 46).

Ultra-hochfester Beton wird, wie Beispiele weiter unten zeigen, häufig im Brückenbau eingesetzt und kann zu einer Gewichtsersparnis von 80% eines konventionellen Betons C55/67 führen (4 S. 48).

Das erste große Bauprojekt bei dem UHPC zum Einsatz kam, ist die Sherbrooke Bridge, eine Fußgängerbrücke in Kanada (siehe Bild 2.3) (3). Der verwendete Hochleistungsbeton weist eine Druckfestigkeit von über 200 N/mm² und eine Biegezugfestigkeit von 40 N/mm² auf (4 S. 47). Die Brücke besteht aus einer schlanken Konstruktion mit einer Spannweite von 60 m, einer Überbauhöhe von 3,5 m, einer Überbaubreite von 3,3 m und einer Dicke der Fußgängerplatte von 30 mm (10 S. 32).



Bild 2.3: Die Sherbrooke Bridge in Kanada aus Ultrahochleistungsbeton (3)

In Österreich, bei Völkermarkt in Kärnten, entstand die weltweit erste Bogen- und Straßenbrücke aus UHPC. Die „Brücke über die Wild“ umfasst einer Länge von 157 m und einer Spannweite von 70 m (11) (10 S. 32). Das Tragwerk wurde im Bogenklappverfahren aus UHPC-Fertigteilen errichtet (siehe Bild 2.4 und Bild 2.5) (12).



Bild 2.4: Erste Bogenbrücke aus UHPC in Kärnten/Österreich im Bau (13)

Bild 2.5: Erste Bogenbrücke aus UHPC in Kärnten/Österreich nach Fertigstellung (14)

Weitere bekannte Brücken aus UHPC sind:

- Die Gärtnerbrücke über die Fulda in Kassel (errichtet 2005)
- Die Seonyu Footbridge in Seoul (errichtet 2002 – siehe Bild 2.6)



Bild 2.6: Seonyu Fussgängerbrücke aus UHPC in Seoul (3)

- Sermaises Fußgängerbrücke in Frankreich (errichtet 2001)
- Sakata Mirai Footbridge in Japan (errichtet 2002).

Ein sehr wesentliches Anwendungsgebiet für UHPC ist der Hochhausbau. Waren die Gebäudehöhen bisher aufgrund von Eigengewicht und Druckfestigkeiten herkömmlicher Baustoffe wie Stahl begrenzt, ermöglicht UHPC die Ausführung immer höherer Hochhausprojekte. Allein das im Vergleich zu Stahl geringere Gewicht ist ein wesentlicher Vorteil im Hochhausbau, wie in Bild 2.7 dargestellt ist.

Der Anteil des „Eigengewichts der stützenden Bauteile an der Gesamtbelastung“ wurde hier „mit 30% in Rechnung“ gestellt (Teilsicherheitsbeiwert $\gamma=1,38$) (1).

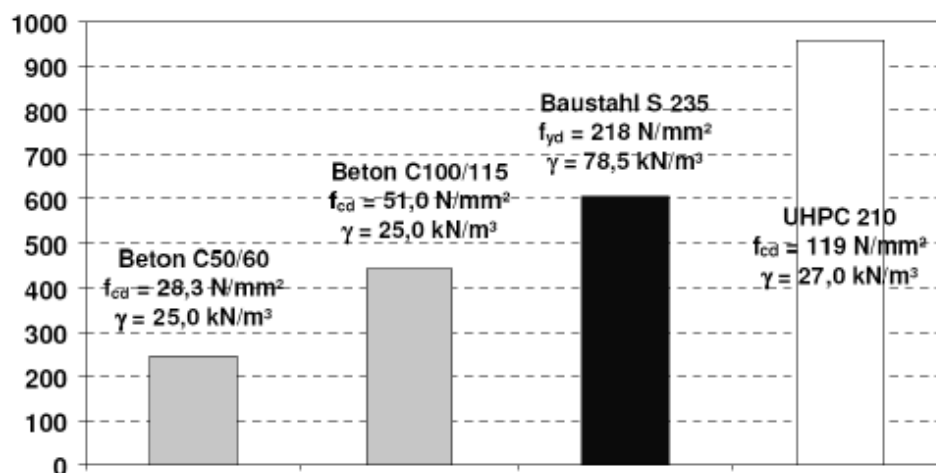


Bild 2.7: Maximal ausführbare Gebäudehöhe nach Betonsorte (1 S. 298)

Beim derzeit höchsten Gebäude der Welt, Burj Khalifa in Dubai, mit 828 m Höhe und mehr als 160 Stockwerken wurde bis zur 155. Etage hochfester Beton verwendet (15). Die besondere Herausforderung bestand darin, den Beton flüssig in die entsprechenden Höhen zu pumpen und ein rasches Abbinden zu ermöglichen (16).

Ein weiterer Grund für die Verwendung von UHPC im Hochhausbau sind die positiven seismischen Eigenschaften. Vor allem in Kombination mit Fasern lässt sich das Materialverhalten von UHPC in Bezug auf dynamische Belastungen optimieren (17).

UHPC weist eine gute Resistenz gegen das Eindringen aggressiver Substanzen bedingt durch die hohe Dichtigkeit und die geringe Porosität des Baustoffes auf. Aufgrund dessen kommt UHPC mittlerweile in der Atomindustrie als „Container zur Langzeitlagerung von Nuklearabfall“ zum Einsatz (4) (18).

Diese Widerstandsfähigkeit stellt einen der wesentlichen Faktoren da, der eine Überlegung der Übertragung der Erfahrungen aus der UHPC-Technologie in den Feuerfestbereich rechtfertigen.

2.3 Zusammensetzung

2.3.1 5-Stoff-System

Ursprünglich verstand man unter Beton einen erhärteten Stein, der aus folgenden 3 Bestandteilen hergestellt wird: Zement, Gestein und Anmachwasser. Vor allem bei der Entwicklung von ultrahochfestem Beton wurde dieses sogenannte 3-Stoff System um zumindest 2 Komponenten, Zusatzmittel und mineralischen Zusatzstoffen in Form von Silikastaub, erweitert. Dies führte zu einem niedrigeren W/Z-Wert und zu einem dichteren Gefüge mit höheren Festigkeiten. Mit Hilfe von Steinkohlenflugasche und Verflüssigern konnte der Zementanteil gesenkt und die Verarbeitung vereinfacht werden. Durch Verwendung hochwirksamer PCE-Fließmittel können selbstverdichtete Betone sowie ultrahochfeste Betone hergestellt werden (10 S. 11) (19) (1). In Bild 2.8 sind die fünf Ausgangsstoffe des ultrahochfesten Betons dargestellt.

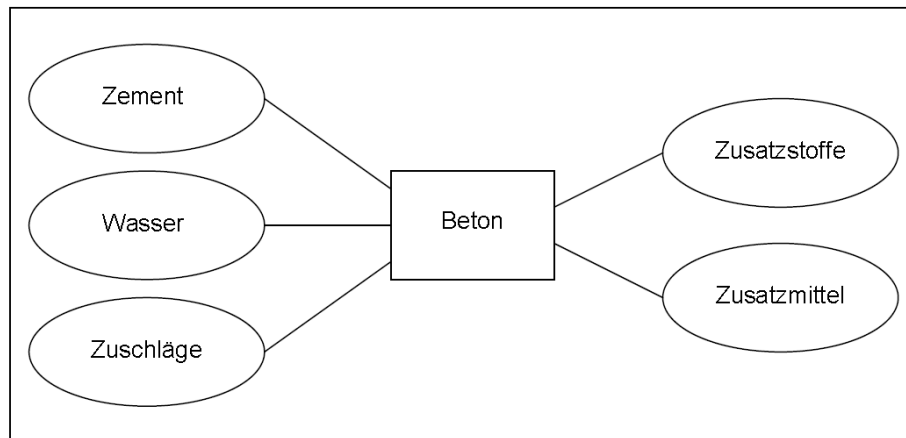


Bild 2.8: Ausgangsstoffe des Betons (4)

2.3.1.1 Zement

„Zement ist ein fein gemahlenes, hydraulisches Bindemittel. Er setzt sich zusammen aus Verbindungen des CaO mit SiO₂, Al₂O₃ und Fe₂O₃. Zement reagiert mit Wasser und erhärtet dabei sowohl an der Luft als auch unter Wasser zu einem künstlichen Stein“ (20 S. 235). Im Vergleich zu Gips oder Kalk zeichnet sich der erhärtete Zement durch eine höhere 28-Tage-Druckfestigkeit (mindestens 30 N/mm²) aus und ist wasserbeständig (19 S. 11) (20 S. 235 ff.).

In der EN 197-1 wird Zement mit dem Namen CEM in 5 Hauptzementgruppen unterteilt:

- CEM I Portlandzement
- CEM II Portlandcompositzement
- CEM III Hochofenzement
- CEM IV Puzzolanzement
- CEM V Kompositzement.

Ein Vergleich der chemischen Zusammensetzungen wird in Tabelle 2.1 im Detail dargestellt.

Tabelle 2.1: Vergleich der chemischen Zusammensetzungen in Prozent (20 S. 238)

Stoffkomponente	Portlandzement CEM I	Eisenportlandzem. CEM II/B-S	Hochofenzement CEM III/B	Trasszement CEM II/B-P
CaO	61 bis 69	52 bis 66	43 bis 60	43 bis 58
SiO ₂	18 bis 24	19 bis 26	23 bis 32	25 bis 28
Al ₂ O ₃	4 bis 8	4 bis 10	6 bis 14	6 bis 9
Fe ₂ O ₃ , FeO	1 bis 4	1 bis 4	0,5 bis 3	2,5 bis 3,5
MgO	0,5 bis 4	0,5 bis 5	1,0 bis 9,5	1,0 bis 3,0
SO ₃	2,0 bis 3,5	2,5 bis 4,0	1,0 bis 4,5	2,0 bis 3,0
Mn ₂ O ₃	0 bis 0,5	0 bis 1,0	0,1 bis 2,5	0,1 bis 0,3

Im Allgemeinen werden für die Zementpulverherstellung hauptsächlich die natürlich gewonnenen Rohstoffe Kalkstein (CaCO₃), Sand (Kieselsäure: SiO₂), Ton (für SiO₂ und Al₂O₃) sowie Eisenerz

(Eisen(III)-oxid: Fe_2O_3) verwendet (10 S. 11 ff.) (20 S. 235 ff.). Grob beschrieben wird das Mehl aus den oben genannten Stoffen bei 800°C getrocknet und danach in Drehrohröfen im Temperaturbereich von 1400°C bis 1450°C in Klinker umgewandelt und danach unter Beigabe von Gips vermahlen (21). Der gesamte Umwandlungsprozess dauert ca. 1 Stunde.

Während des Prozesses entstehen sogenannten Klinkerphasen, die die Eigenschaften der Zemente bei ihrer Erhärtung beeinflussen (20 S. 235 ff.).

Die vier Klinkerphasen und ihre Eigenschaften werden in Tabelle 2.2 dargestellt (Freikalk CaO und Periklas MgO gelten als Begleitelemente der Klinkerphasen):

Tabelle 2.2: Klinkerphasen, ihre Masseanteile in Prozent und ihre Eigenschaften (20 S. 239)

Klinkerphasen	Chemische Formeln	Kurzbezeichnung	Eigenschaften	Massenanteile im Klinker (%)
Tricalciumsilicat (Alit)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	schnelle Erhärtung, hohe Hydratationswärme, hohe Festigkeit	45 bis 80
Dicalciumsilicat (Belit)	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	langsame, stetige Erhärtung, niedrige Hydratationswärme, hohe Festigkeit	0 bis 32
Tricalciumaluminat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	schnelle Reaktion mit H_2O , hohe Hydratationswärme, geringe Festigkeit, anfällig gegen Sulfatwasser	7 bis 15
Calciumaluminatferrit	$4 \text{ CaO} (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_4 (\text{A}, \text{F})$	langsame und geringe Erhärtung, widerstandsfähig gegen Sulfatwasser	4 bis 14
Freies CaO (Freikalk)	CaO	C	in geringen Mengen unschädlich, sonst Kalktreiben	0,1 bis 3
Freies MgO (Periklas)	MgO	M	in größeren Mengen Treiben	0,5 bis 5

Das Tricalciumsilicat C_3S und das Dicalciumsilicat C_2S bewirken hohe Endfestigkeiten. Aufgrund des höheren Kalkanteils erhärtet das Tricalciumsilicat C_3S rasch und weist eine hohe Anfangsfestigkeit auf. Im Gegensatz zum Dicalciumsilicat C_2S entsteht während des Hydratationsprozesses eine hohe Hydratationswärme. Das Tricalciumaluminat C_3A wirkt ähnlich, weist allerdings geringere Festigkeiten auf und ist sulfatwässeranfällig.

Das Calciumaluminatferrit $\text{C}_4(\text{A}, \text{F})$ weist eine nur langsame Erhärtung auf. Aufgrund seiner geringen hydraulischen Eigenschaften trägt es auch kaum zur Festigkeitsentwicklung bei. Als großer Vorteil kann jedoch die Resistenz gegen Sulfatwasser angesehen werden (20 S. 240).

Im Portlandzementklinker sind alle 4 Klinkerphasen enthalten. Je nach Bedarf unterschiedlicher Eigenschaften werden die Anteile variiert.

Aufgrund des Bestrebens einen niedrigen W/Z-Wert zu erreichen, werden bei der Herstellung von UHPC vorwiegend Zemente „mit einem geringen Wasserbedarf und einer guten Verträglichkeit mit

Fließmittel“ verwendet. Weiters ist ein langsames Erstarrungsverhalten von Vorteil. Ein geringer Gehalt an C_3A führt zu einer besseren Verarbeitbarkeit und einem geringeren Bedarf an Wasser und Fließmittel (4 S. 9) (22 S. 32 ff.).

2.3.1.2 Wasser

Wie in der Abbildung unten zu erkennen ist, setzt sich der Gesamtwassergehalt aus mehreren Komponenten zusammen:

- dem Zugabewasser
- der Eigenfeuchte der Zuschläge und
- dem Wasseranteil von Zusatzmittel und Zusatzstoffen (17 S. 11).

Als Zugabewasser eignet sich im Allgemeinen Trinkwasser. Bei UHPC-Mischungen wird der Wassergehalt mit 140 bis 220 l/m³ angegeben, wobei der Gesamtwassergehalt (Bild 2.9) mit 180 bis 200 l/m³ eingegrenzt werden kann (22 S. 39).



Bild 2.9: Gesamtwasserzugabe von Beton (8)

2.3.1.3 Zuschläge

Bei der Herstellung von UHPC spielt die Art der Gesteinskörnung eine wesentliche Rolle. Mit einem Volumenanteil von ca. 70% stellen sie den größten Anteil der Betonmischung dar. Die Wahl der Gesteinskörnungen ist von folgenden Eigenschaften abhängig:

- Druckfestigkeit
- E-Modul
- Wasseranspruch
- Oberflächenrauheit und
- Kornform (17 S. 13) (4 S. 12) (7 S. 38).

Zu beachten sind weiters mögliche Wechselbeziehungen bzw. der Verbund zwischen Gesteinskörnung und Zementstein, die aufgrund mineralischer Zusammensetzungen hervorgerufen werden können (4 S. 12 ff.).

Bei UHPC kommt als Gesteinskörnung Quarzsand zur Anwendung. Quarzsande zeichnen sich durch hohe Festigkeiten aus. Quarzsand sollte laut Literatur (22 S. 34 ff.) (4 S. 12 ff.) (8 S. 29 ff.) ein Größtkorn von maximal 1 mm aufweisen. 0,4 mm werden empfohlen, um eine zufriedenstellende Verarbeitbarkeit sowie einen geringen Luftporengehalt beim Frischbeton zu erreichen.

2.3.1.4 Zusatzstoffe

Bei der Herstellung von UHPC kommen hauptsächlich folgende Zusatzstoffe zum Einsatz:

- Silikastaub
- Flugasche
- Metakaolin
- Gesteinsmehl
- Feinhüttensand (23 S. 9) (17 S. 15 ff.).

Den bevorzugten Zusatzstoff bei UHPC stellt jedoch Silikastaub (Mikrosilika oder Nanosilika) dar. Silikastaub ist ein Abfallprodukt, das bei der Siliciummetall- und Ferrosiliciumproduktion in Form von kondensiertem Filterstaub anfällt. Das im Rauchgas enthaltene Siliciumoxid reagiert mit dem Sauerstoff und kondensiert als amorphes Siliciumdioxid (Nanosilika) (17 S. 15 ff.) (8 S. 32 ff.).

Mikrosilika weisen eine Dichte von etwa 2200 bis 2300 kg/m³ auf. Die Größe eines Silikastaubteilchens beträgt durchschnittlich 1 µm. Im Vergleich dazu ist die Korngröße von Zement etwa 30- bis 100-mal größer (4 S. 15). Die extrem geringe kugelförmige Partikelgröße führt zu einer hohen Packungsdichte, einer verbesserten Homogenisierung des Gefüges sowie zu gesteigerter Füllerwirkung. „Die Runden Partikel wirken wie ein „Schmiermittel“ und verbessern die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons“ (22 S. 33). Neben der Hydratation des Zements kommt es zu einer puzzolanischen Reaktion zwischen dem Calciumhydroxid Ca(OH)₂ und dem amorphem Silikastaub SiO₂. Dies führt zu den festigkeitssteigernden CSH-Phasen (22 S. ff.) (4 S. 15 ff.).

Nanosilika zeichnen sich durch einen SiO₂-Anteil von fast 100 M.-% aus. Im Vergleich zu Mikrosilika sind die Partikel um das zehnfache kleiner, weisen jedoch die gleichen puzzolanischen Eigenschaften auf (22 S. 33 ff.).

Als Gesteinsmehl wird vorwiegend Quarz(-mehl) verwendet. Quarzmehl weist eine Mahlfeinheit in der Größenordnung von Zement auf. *Kirnbauer* weist in seinen Untersuchungen auf eine

Gleichwertigkeit von Quarzmehl und Kalksteinmehl hin. Bei gleichbleibender mechanischer Festigkeit weist Kalksteinmehl bessere rheologische Eigenschaften auf und senkt den Fließmittelbedarf (22 S. 33 ff.).

2.3.1.5 Zusatzmittel

Betonzusatzmittel werden in Österreich in der ÖNORM EN 934-2 und in Deutschland in den Zulassungs- und Überwachungsgrundsätzen des Deutschen Instituts für Bautechnik geregelt (22 S. 35 ff.) (17 S. 13 ff.). Für die Herstellung von UHPC sind folgende Zusatzmittel von Bedeutung:

- Betonverflüssiger
- Fließmittel
- Stabilisierer
- Luftporenbildner
- Verzögerer.

Betonzusatzmittel dienen zur Veränderung bzw. Optimierung von Eigenschaften in Bezug auf die Verarbeitbarkeit, das Erstarren, das Erhärten oder den Frostwiderstand von Beton und werden in geringen Mengen in flüssiger oder pulverförmiger Konsistenz dem Beton beigelegt (4 S. 16 ff.) (17 S. 13 ff.).

„Fließmittel sind hochwirksame Betonverflüssiger“ (17 S. 13). Der Unterschied zum Betonverflüssiger besteht darin, dass Betonverflüssiger die Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei Beibehaltung des gleichen Wassergehalts verbessert, hingegen Fließmittel zu einer optimalen Verarbeitbarkeit des Betons bei einer erheblichen Reduktion des Wasseranspruches führen (8 S. 36 ff.) (22 S. 35 ff.).

Luftporenbildnern werden eingesetzt, um gleichmäßig verteilte Luftporen mit einem Durchmesser von 0,01 bis 0,3 mm zu erzeugen, die zum Abbau von Druck im Zementstein führen (4 S. 17 ff.). Dadurch kommt es zu einem höheren Frost- sowie Frostauszugwiderstand (17 S. 14 ff.).

Verzögerer führen zu einer langsameren Erstarrungszeit des Zementleims und zu einer verlängerten Verarbeitbarkeit des Betons (8 S. 37).

2.3.1.6 Fasern

Oft werden aufgrund unterschiedlichster Anforderungen bei UHPC Fasern eingesetzt. Üblicherweise werden bei ultrahochfesten Betonen hauptsächlich Stahlfasern und Polypropylenfasern eingesetzt. Organische Fasern wie Flachs, Baumwolle, Zellulose sind im UHPC-Bereich aufgrund ihrer hohen Wasseraufnahmekapazität weniger üblich (4 S. 18 ff.). Generell können alle beim Faserbeton

eingesetzten Arten auch für die Herstellung von UHPC verwendet werden. Der Einsatz und dessen Sinnhaftigkeit sind im Einzelfall jedoch zu überprüfen (24).

Stahlfasern können die Zugfestigkeit, die Dauerhaftigkeit, das Nachbruchverhalten und die Duktilität des Betons verbessern. Üblicherweise werden gerade Fasern mit einer glatten Oberfläche verwendet. Jedoch ist die Auswahl an Herstellungsvarianten, Formen und Längen vielfältig. Für die Herstellung von UHPC können Spezialfertigungen von Fasern mit einer Zugfestigkeit von mehr als 2000 N/mm² verwendet werden. (Im Vergleich: übliche Stahlfaserarten liegen im Bereich von 1000 bis 1500 N/mm²). Ihre Länge liegt bei 6 mm und der Durchmesser bei 0,1 mm (4 S. 22 ff.).

Polypropylenfasern wirken sich positiv auf das Bruch- und Nachbruchverhalten sowie auf das Brand- und Fröhschwindverhalten von UHPC-Betonen aus (24). Die Zugabe von Kunststofffasern bei UHPC unterstützt die Reduktion des Abplatzverhaltens bei Brand. Da Polypropylenfasern bei einer Temperatur von 160°C schmelzen, entstehen im Zementstein Mikroporen, die während des Entwässerungsprozesses durch das Aufheizen ein frühzeitiges Abströmen des Dampfes ermöglichen (25).

Für die Zugabe von Fasern bei ultrahochfesten Betonen wird empfohlen, Fasern mit einem Durchmesser zu verwenden, der ungefähr dem Durchmesser „der zu überbrückenden Mikrorisse“ entspricht. Weiters wird empfohlen für die optimale Verarbeitbarkeit eher kurze Fasern zu verwenden (26 S. 67 ff.).

2.4 Der Mischprozess

Der Mischprozess ultrahochfester Betone hat einen entscheidenden Einfluss auf beinahe alle Eigenschaften des Frischbetons und Festbetons (22 S. 48 ff.). Das Ergebnis des Mischprozesses wird von mehreren Komponenten wie der Mischtechnik, der Mischdauer, den Mischwerkzeugen und der Werkzeuggeschwindigkeit sowie der Mischreihenfolge beeinflusst, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird (8 S. 42 ff.). Selbst beim Dosieren der Ausgangsstoffe führen bereits geringe Abweichungen zu unterschiedlicher Konsistenz des Frischbeton sowie veränderten Festbetoneigenschaften (4 S. 53 ff.).

2.4.1 Mischtechnik

Als Mischen bezeichnet man „die Umkehrung einer Trennung“ (27) bzw. „eine Stoffvereinigung aus unterschiedlichen Stoffkomponenten“ (22 S. 49). In der ÖNORM B 4710 – 1 wird vom Mischer erwartet, dass dieser in der Lage ist, „mit seinem Fassungsvermögen innerhalb der Mischdauer

eine gleichmäßige Verteilung der Ausgangsstoffe und eine gleichmäßige Verarbeitbarkeit des Betons zu erzielen“ (22 S. 48). Zusätzlich sollte solange gemischt werden, bis eine gleichförmig erscheinende Mischung entstanden ist (22 S. 48 ff.).

2.4.2 Mischablauf, Mischdauer und Mischreihenfolge

Im Allgemeinen werden alle trockenen Feststoffe in einen Mischbehälter eingefüllt und nach einer vordefinierten Mischzeit homogenisiert. Danach werden Wasser und Fließmittel hinzugefügt und ebenfalls über eine bestimmte Dauer vermischt. Fasern werden zuletzt ergänzt (8).

Die Bedeutung der Mischreihenfolge ist dabei nicht zu unterschätzen. So dürfte der Zeitpunkt der Zugabe von Fließmittel nach *Kirnbauer* eine wesentliche Einflussgröße auf die Frischbetoneigenschaften von UHPC haben. Empfohlen wird daher, zuerst einen Teil des Fließmittels zeitgleich mit Wasser zu vermischen, um ein Verklumpen der Feinststoffe zu verhindern, und später den anderen Teil dem Mischgut beizufügen. Vor allem hier ist auf die Mischdauer zu achten (22 S. 55).

2.4.3 Mischwerkzeuge

Generell können die Ausgangsstoffe des UHPCs mit Geräten und Maschinen (Zwangsmischer) vermischt werden, mit denen Normalbeton hergestellt wird. In den meisten Fällen werden dafür Zwangsmischer oder Freifallmischer eingesetzt. Die wesentliche Aufgabe besteht in der optimalen Homogenisierung der Gefügestruktur durch intensives Vermischen der Komponenten (9 S. 22).

Um eine intensivere Vermischung und eine bessere Mischgüte zu garantieren, werden oftmals Intensivmischer wie der sogenannte Eirich-Mischer, wie in Bild 2.10 dargestellt, eingesetzt (9 S. 23) (22 S. 53).



Bild 2.10: Darstellung eines Eirich-Mischers (28)

Beim Eririch-Mischprozess wird der Transport des Mischgutes vom Mischvorgang entkoppelt (29). Bei dieser Art des Mischens wird das Mischgut mit Hilfe eines schräg gestellten, rotierenden Mischbehälters bewegt (4 S. 57) (22 S. 49). „Ein feststehender Wandabstreifer als Strömungslenker wirft es auf ein schnell drehendes Mischwerkzeug“ (22 S. 50). Durch diesen Vorgang findet innerhalb einer Umdrehung des Mischtellere eine komplette Umwälzung des Mischinhaltes statt (22 S. 50).

Die Technologie eines Vakuummischers entspricht jener des Intensivmischers mit einer wesentlichen zusätzlichen Funktion: die Reduktion des Luftgehaltes im Beton (30 S. 31 ff.) (31 S. 22 ff.). Aufgrund der – im Vergleich zu Normalbeton – zähen Konsistenz des UHPC-Zementleims fällt das Entlüften durch Rütteln als Möglichkeit weg. Bei der Herstellung von UHPC wird am Ende eines Mischvorgangs mit Druck von 60 mbar während der letzten Mischminute der Luftgehalt der Zementmischung reduziert (22 S. 55 ff.).

Nach *Kirnbauer* wird durch den Vakuummischprozess die Mikrostruktur der Kapillar- und Gelporen beeinflusst. Dies führt zu einer Verbesserung der Dauerhaftigkeit von UHPC (22 S. 56). Auch die mechanischen Festigkeiten des Festbetons können merklich verbessert werden (4 S. 59 ff.) (30 S. 31 ff.).

2.4.4 Die Verarbeitung und Nachbehandlung

Die Verarbeitung von UHPC kann generell nach herkömmlichen für den Normalbeton üblichen Verfahren und Maschinen vollzogen werden. Da sich ultrahochfester Frischbeton durch rasches Ansteifen auszeichnet, ist eine Zugabe von Fließmittel auf der Baustelle empfehlenswert (9 S. 22 ff.) (1).

Der Einbau selbst erfolgt mit Betonpumpen. Die sorgfältige Nachbehandlung steigert die Festigkeiten des UHPCs nachhaltig (9 S. 22 ff.) (4 S. 64). Die Nachbehandlungsmethoden zielen vor allem auf ein Vermeiden von Rissen und eine gesteigerte Endfestigkeit ab. So wird verhindert, dass im bereits erhärtenden Beton unvorteilhafte Temperaturentwicklungen (z.B. hohe Temperaturunterschieden zwischen dem Äußeren und Inneren des Betons) entstehen ohne den Wasserbedarf für die Hydratation negativ zu beeinflussen (9 S. 22 ff.).

2.4.5 Das Erhärten

Ultrahochfester Beton erreicht 75% der 28-Tages-Festigkeit bereits nach sieben Tagen, seine Endfestigkeit oft erst nach Jahren. Bei geringerer Temperatur kommt es zu einer Verzögerung bei

hohen Temperaturen zu einer Beschleunigung des Erhärtungsprozesses. Im Allgemeinen ist wie bei Normalbeton der Erhärtungsprozess abhängig von

- der Bindemittelart
- der Wärmeentwicklung während des Erstarrungsprozesses
- der Form und Breite des Betonquerschnittes und
- dem Anteil des zugegebenen Wassers (8 S. 44 ff.).

2.5 Mechanische Eigenschaften

2.5.1 W/Z-Wert

Zu den bedeutendsten Formeln der Betontechnologie zählt die Berechnung des Wasser-Zement-Wertes (32 S. 23). Der Wasser-Zement-Wert ω ist das Verhältnis von Wassermasse W zu Zementmasse Z (8 S. 39):

$$\frac{W}{Z} = \frac{\text{Volumen des Wassers}}{\text{Masse des anteiligen Zements}}$$

Mit W = Wasser und Z = Zement

Formel 2-1: Wasser-Zement-Wert (26)

Für die Erreichung hoher Betonfestigkeiten ist ein besonders geringer Wasser-Zement-Wert ausschlaggebend (siehe Bild 2.11).

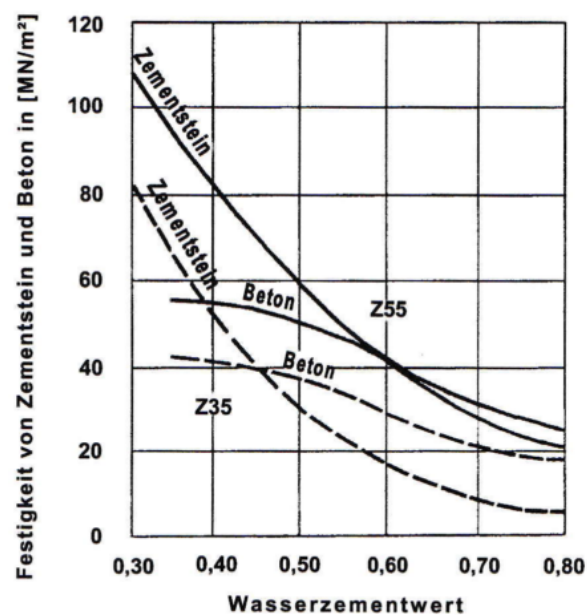


Bild 2.11: 28-Tage Druckfestigkeit von Zementstein und Normalbeton in Abhängigkeit vom W/Z-Wert und der Zementfestigkeitsklasse (32)

Für eine vollständige Hydratation des Zements können ca. 25% des Gewichts chemisch und weitere 15% physikalisch mit Wasser gebunden werden (32 S. 23 ff.). Überschüssiges Wasser in den Gelporen und Kapillaren erweist sich als nachteilig in Bezug auf die Festigkeit und Dichtigkeit.

Sehr niedrige W/Z-Werte führen vor allem in Kombination mit geringer Porosität zu höheren Festigkeiten, da die Zementpartikel nur teilweise hydratisieren und an den Kornrändern besonders fest verkleben (32 S. 23 ff.). Bei ultrahochfesten Betonen liegen die W/Z-Werte im Idealfall zwischen 0,13 und 0,20 (im Vergleich: bei Normalbeton im Bereich von 0,4).

Neben der Druckfestigkeit beeinflusst der W/Z-Wert auch weitere Eigenschaften des Festbetons (siehe Bild 2.12):

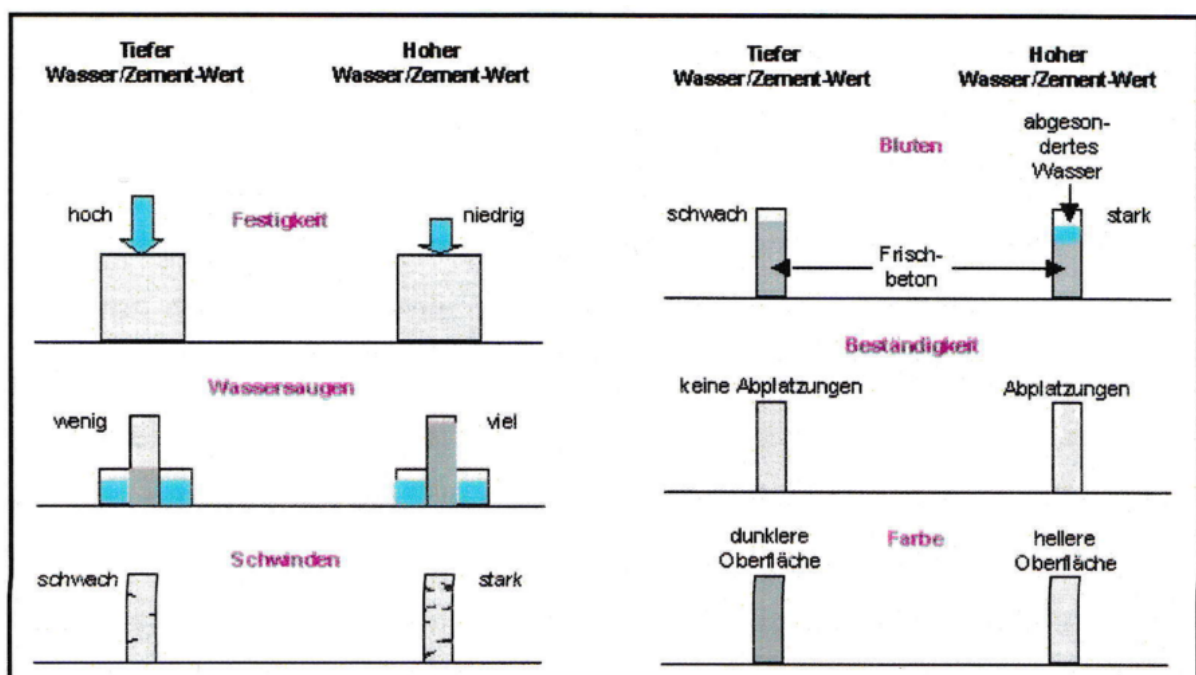


Bild 2.12: Einfluss des W/Z-Wertes auf Betoneigenschaften (32)

2.5.2 W/B-Wert

Der Wasser-Bindemittel-Wert berechnet das Verhältnis vom wirksamen Wassergehalt zum anrechenbarem Bindemittelgehalt (33). In der ÖNORM B 4710-1 wird der W/Z-Wert durch den W/B-Wert ersetzt (8 S. 40).

Die Berechnung des W/B-Wertes kann wie folgt durchgeführt werden:

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

Mit W = Wasser, B = Bindemittelgehalt und k = Korrekturfaktor

Formel 2-2: Wasser-Bindemittel-Wert (26)

Wie beim Wasser-Zement-Wert weist auch hier ein hoher Wasser-Bindemittel-Wert (sprich: ein Beton mit hoher Porosität) auf eine geringere Festigkeit hin (33).

In der UHPC-Technologie wurde der kleinste jemals erzielte Wasser-Bindemittel-Wert mit einem Wert von 0,08 erreicht. (8 S. 41).

2.5.3 Wasser/Feststoff-Wert

Der Wasser-Feststoff-Wert W/F_v ist für die Optimierung von UHPC-Mischungen von essentieller Bedeutung (26 S. 8 ff.). Er „charakterisiert das spezifische Feststoffvolumen im Leim bei der für die angestrebte Verarbeitungskonsistenz erforderlichen Wassermenge und die Lagerungsdichte der festen Partikel im erhärteten Beton. Er ist ein Maß für den physikalischen Beitrag der Feinststoffe $\leq 0,125$ mm einschließlich des Zements zur Gefügedichtigkeit und zur Festigkeit des Betons“ (34 S. 141 ff.). Bei gleichbleibendem Wasser-Zement-Wert bedeutet ein geringer Wasser-Feststoff-Wert eine höhere Druckfestigkeit und geringere Porosität. Der Wasser-Feststoff-Wert wird hauptsächlich vom Wasserbedarf der Feinststoffe beeinflusst und gibt Auskunft über die optimale Packungsdichte der Betonmischung. Werden die Hohlräume zwischen den groben Körnern optimal durch Feinstkörner ausgefüllt, fehlt die Möglichkeit, einen Wasserfilm um die Partikel zu bilden und der Wasseranspruch der Betonmischung sinkt (2).

Neben der Packungsdichte und dem damit zusammenhängendem Wasserbedarf spielt auch die Korngröße bei den oben genannten Eigenschaften eine große Rolle. Nicht optimal geformte (z.B. sehr kantige und eckige) und oberflächenbehaftete (z.B. raue) Körner beeinflussen die Packungsdichte negativ und benötigen bei der Oberflächenbenetzung wesentlich mehr Wasser. Genau genommen müssten weitere Aspekte wie das Agglomerationsverhalten der Feinststoffe oder der hohe Wasseranspruch sehr feiner Füllkörper miteinbezogen werden.

Zur Vereinfachung geht man allerdings von folgenden Formeln aus (siehe Formel 2-3 und Formel 2-4) (2):

$$\frac{w}{F_v} = \frac{w}{\sum (z + \text{Feinstoffe})_{\text{vol}}} \quad \dots \text{mit } W = \text{Wasser}, Z = \text{Zement und } F_v = \text{Feststoff}$$

Formel 2-3: Volumenbezogener Wasser-Feststoff-Wert (34)

$$\frac{w}{F_m} = \frac{w}{\sum (z + \text{Feinstoffe})_{\text{masse}}} \quad \dots \text{mit } W = \text{Wasser}, Z = \text{Zement und } F_m = \text{Feststoff}$$

Formel 2-4: Massebezogener Wasser-Feststoff-Wert (34)

Der rein massebezogene Wasser-Feststoff-Wert wird besonders bei rein inerten Stoffen mit gleicher Dichte herangezogen. Der volumenbezogene Wasser-Feststoff-Wert wird verwendet, um indirekt Auskunft über den Einfluss einer optimierten Packungsdichte der Feinstoffe in Bezug auf die rheologischen Eigenschaften, die Festigkeiten und die Porosität zu geben (26 S. 8 ff.) (34). In Bild 2.13 wird der Zusammenhang und die Einflussfaktoren des Wasser-Feststoff-Wertes schematisch dargestellt.

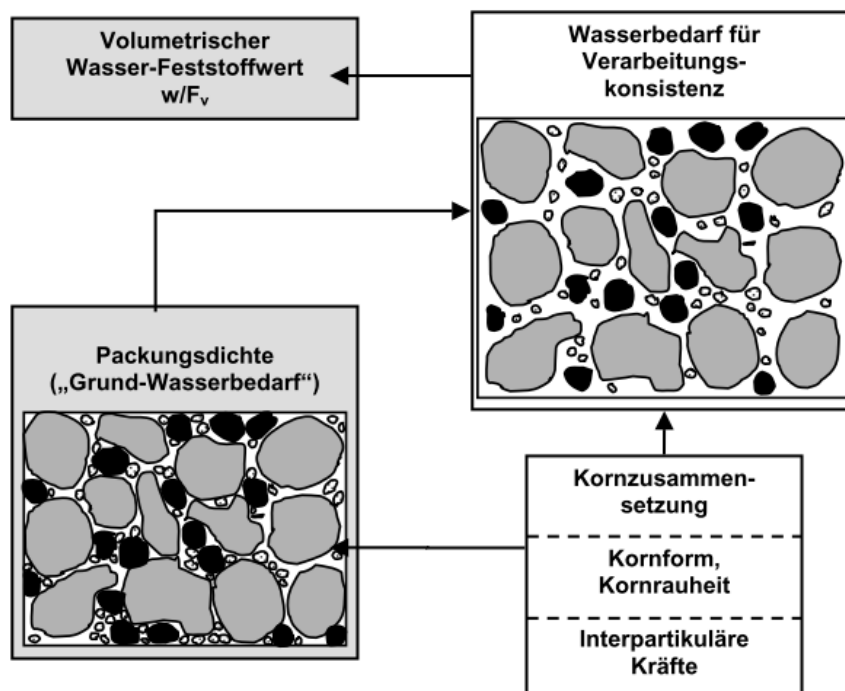


Bild 2.13: Einflussgrößen der Feinstoffe auf die Kornpackung und den volumetrischen Wasser-Feststoff-Wert (1)

2.5.4 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit stellt die bedeutendste Kenngröße von Betonen dar. Besonders bei der Herstellung von UHPCs ist sie die eigentliche Zielgröße. Somit erfolgt die Einteilung der Betone in den Normen zumeist nach der Druckfestigkeit. Die ÖNORM EN 206-1 bezeichnet Betone mit Festigkeiten von mehr als 100 N/mm² als ultrahochfest und klassifiziert sie unter dem Namen C 100/115. Die Druckfestigkeit wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst, wie zum Beispiel

- der Packungsdichte
- der Mischung und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und
- der Verarbeitung und Nachbehandlung (4 S. 74 ff.).

2.5.5 Biegezugfestigkeit

Ultrahochfester Beton weist im Vergleich zu normalem Beton nicht nur hohe Druckfestigkeiten, sondern auch hohe Zugfestigkeiten auf. Biegezugfestigkeiten erreichen im Allgemeinen den doppelten Wert von jenem, der beim Auftreten der ersten Risse erreicht wird. Die Beigabe von Fasern kann die Zugfestigkeiten steigern (über 30 N/mm²). Die Biegezugfestigkeit kann durch die Charakteristika des Zementsteins, des Zuschlages sowie des Zement- und Zuschlagsverbundes beeinflusst werden (17 S. 31) (8 S. 46) (4 S. 73).

2.5.6 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul beschreibt das Verhältnis der Spannung zur Dehnung bei der Verformung von festen Körpern (35). Beim Beton wird der E-Modul vor allem von der Qualität des Zementsteins und des Verbunds und der Art der Zuschläge beeinflusst. In der Betontechnologie wird der E-Modul gerne im Zusammenhang mit der Druckfestigkeit genannt. So führt bei Betonrezepturen die Steigerung der Druckfestigkeit meist auch zu einem höheren E-Modul. Ultrahochfeste Betone können E-Modulwerte zwischen 50.000 und 70.000 N/mm² erreichen (4 S. 41).

2.6 UHPC unter Temperatureinwirkung/Hochtemperaturverhalten von UHPC

Bereits in den 1950iger Jahren begann man mit den ersten Versuchen und Untersuchungen zu mechanischen Eigenschaften und zum Verhalten von ultrahochfesten Betonen bei hohen Temperaturbeanspruchungen (36). Normalbeton und ultrahochfester Beton sind im Allgemeinen

nicht für langfristige Belastungen durch hohe Temperaturen konzipiert. Hohe Temperaturbeanspruchungen und Einwirkungen hoher Temperaturen sind meist von vergleichsweise kurzfristiger Dauer und kommen z.B. unbeabsichtigt durch Brand zustande. Vor allem bei der Anwendung von UHPC im Tunnelbau weist die Literatur auf viele Forschungsarbeiten im Bereich der Brandeinwirkungen hin. Eine Vielzahl an Quellen beschreibt den Festigkeitsverlust des UHPCs aufgrund von Brand- und Temperatureinwirkungen (37) (38) (32) (39) (40).

Als Gründe für diesen Festigkeitsabfall werden chemische Vorgänge sowie thermomechanische und – hydraulische Prozesse (darunter Gewichtsverlust und Zersetzungsreaktionen) genannt, die in diesem Abschnitt erklärt werden.

Es ist hinzuzufügen, dass die meisten Versuchsreihen und Forschungsunterlagen mit ultrahochfesten Betonen oftmals den Temperaturbereich von 800°C nicht überschreiten und sich auf die Einwirkung eines Brandes beschränken. Diesbezüglich ist eine Übertragung der Untersuchungen auf Feuerbetone im Langzeit- und Hochtemperaturbereich der Feuerfestindustrie mit Vorsicht zu betrachten.

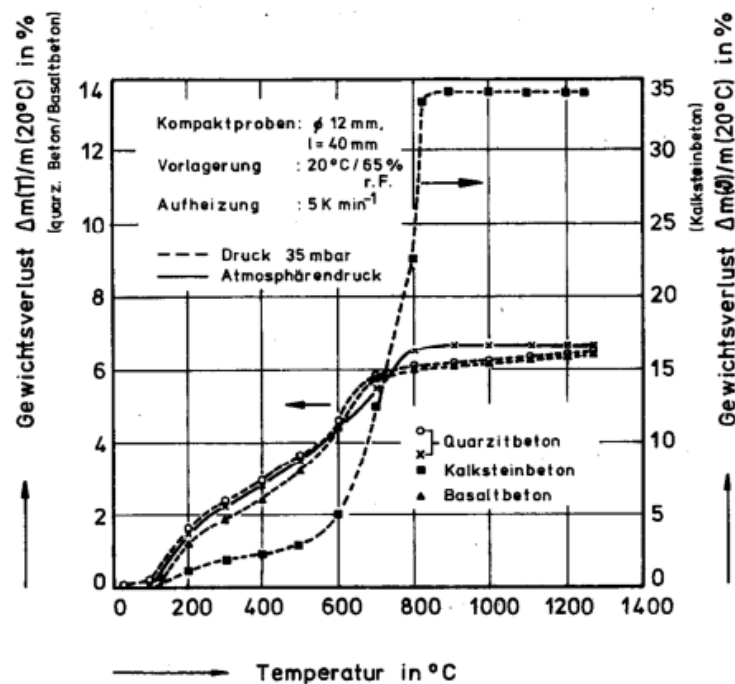


Bild 2.14: Gewichtsverlust von Normalbeton mit Portlandzement

2.6.1 Chemische Vorgänge

Höhere Temperaturen führen im Beton zu Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen, die abhängig von den Zuschlägen variieren können (karbonatische Zuschläge neigen zu Entsäuerung des Kalksteines). Die Umwandlungsreaktionen gehen mit einem Gewichtsverlust des Zementsteins einher (37).

In Tabelle 2.3 sind die wesentlichen Vorgänge in quarzitischen und kalzitischen Betonen während steigender Temperatureinwirkung angegeben. Zwischen 30 und 120°C verdampft das freie und physikalisch gebundene Wasser in den Gelporen bis bei einer Temperatur von 100 bis 300°C der Dehydrationsbeginn einsetzt. Bei 250°C wird das chemisch gebundene Wasser freigegeben. Die Zersetzung des nicht-karbonisierten Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) findet bei einer Temperatur von 450°C bis 550°C statt. Sehr wesentlich ist die maximale Temperatur von 573°C, bei der es zur reversiblen kristallinen Umwandlung des Quarzes von Alpha-Quarz (Tiefquarz mit einer Kristallstruktur eines Tetraeders) zu Beta-Quarz (Hochquarz mit einer Kristallstruktur eines Hexagons) kommt. Durch den sogenannten „Quarzsprung“ kommt es zur schlagartigen Volumssteigerung der quarzitischen Zuschläge, ein Umstand der im Beton zu Gefügespannungen und folglich zu Rissen führt (38). Sehr wesentlich in Bezug auf die Feuerfestindustrie ist die Tatsache, dass bereits bei Temperaturen von 1200°C bis 1300°C Bestandteile des PZ-Betons zu schmelzen beginnen (37) (38) (20).

Tabelle 2.3: Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischen und kalzitischen Betonen (37 S. 35)

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion
30 - 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von freiem und physikalisch gebundenem Wasser
100 - 300	Gelabbau, Dehydrationsbeginn
250 - 600	Abgabe des chemisch gebundenen Wassers
450 - 550	Zersetzung von Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
573	Nur bei Quarz: Quarzumwandlung $\beta \rightarrow \alpha \text{ SiO}_2$
600 - 700	Beginn der Zersetzung der CSH-Phasen; Bildung von $\beta\text{-C}_2\text{S}$
600 - 900	Nur bei Kalkstein: Entsäuerung $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
1200 - 1300	Beginnen des Schmelzens von Zementstein
≥ 1400	Zementstein liegt als Schmelze vor

2.6.2 Temperaturabhängige Druckfestigkeitsentwicklung von UHPC

Betone weisen bei hoher Temperaturbeanspruchung einen Festigkeitsverlust auf, wobei die Festigkeit bei ultrahochfesten Betonen ab 350° Celsius besonders stark abfällt (23).

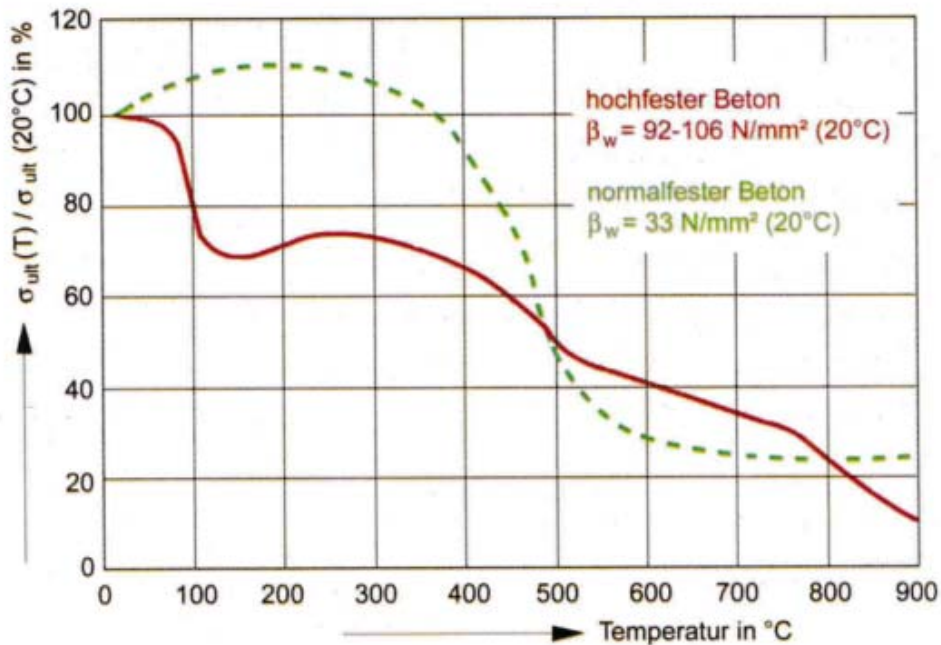


Bild 2.15: Bezogene Hochtemperaturfestigkeit von HPC im Vergleich zu Normalbeton (23)

Hochfester Beton erfährt bei einer Temperatureinwirkung unter 100°C einen Festigkeitsabfall („Festigkeitsloch“), wo hingegen ein konventioneller Beton bis 200°C seine Festigkeit steigern kann und diese erst danach rapide abfällt (siehe Bild 2.15). *Schneider et.al.* beobachten bei ihren Versuchsreihen bei allen von ihnen verwendeten UHPC-Mischungen eine Festigkeitssteigerung (von 30 bis 40%) bis 300°C. Weitere Temperatursteigerungen führen zu einem rapiden Festigkeitsabfall. Bei 100°C wird er zum einen mit der Entstehung von Mikrorissen begründet (41), zum anderen gehen *Schneider et.al.* bei ihren Untersuchungen von einem „temporären Effekt“ aus, „der von der Probeneigenfeuchte und dem Hydratationsgrad abhängig ist“. Dadurch kommt es zu einem „instabilen thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Poren- und Zwischenschichtwasser im Zementgel“ (40).

Bei 200°C steigt die Festigkeit wieder. Hier wird vermutet, dass sich im Zementstein aufgrund einer „Nachhydratation“ durch neu gebildete CSH-Phasen eine Festigkeitsteigerung ergibt („Selbstheilung der Risse“) (40).

Wie aus Bild 2.16 ersichtlich, beträgt der Festigkeitsabfall bezogen auf die Anfangsfestigkeit bei 500°C ungefähr 50%. (38) Der Abfall ab 400°C wird auf verschiedene Mechanismen zurückgeführt. Aufgrund der Entwässerung des Portlandits kommt es zu einer Steigerung der Porosität und zum verstärkten Schwinden des Zementsteins. Dies führt zu einem schwächeren Verbund zwischen Zuschlag und

Zementstein und folglich zu einem Festigkeitsabfall. Der sogenannte Quarzprung führt bei einer Temperatur von 573°C zu einer Volumsvergrößerung, was einen rapiden Festigkeitsverlust von bis zu 30% bewirken kann (42) (40) (38).

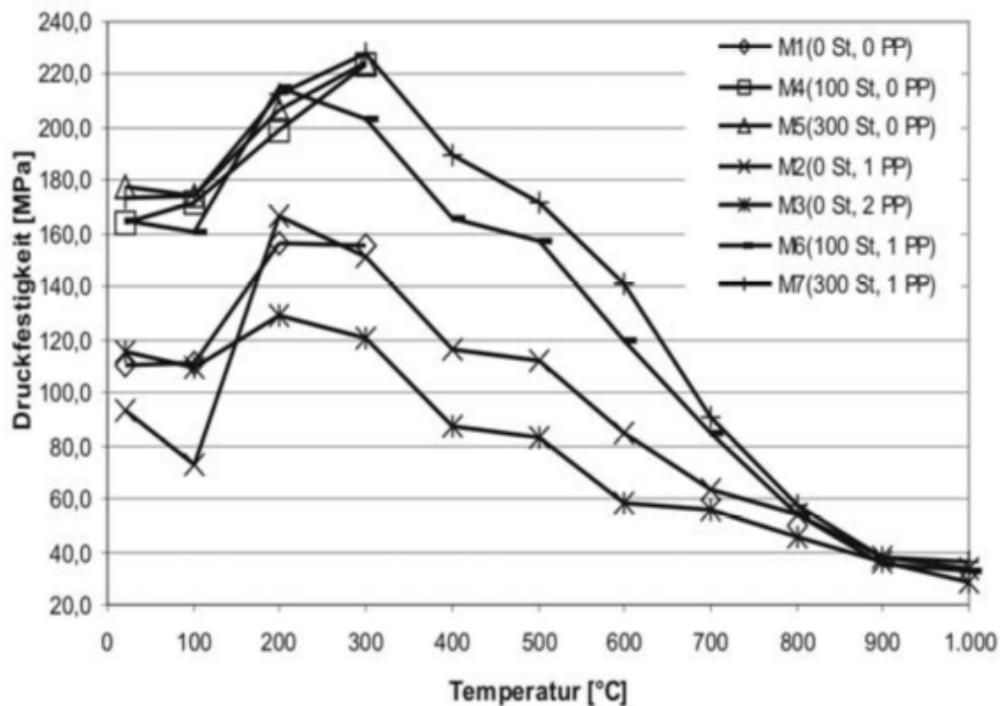


Bild 2.16: Druckfestigkeitsverlauf von UHPC bei Brandversuchen (37 S. 63)

Die günstigsten Mischungen im Bild 2.16, M5 und M7, enthalten Stahlfasern, die das Festigkeitsloch bei 100°C verringern (37 S. 63).

2.6.3 Thermomechanische Prozesse

Aufgrund des Temperaturanstieges entstehen im Betonkörper thermische Dehnungen, die Druck- und Zugspannungen bewirken. Überschreiten diese die Betonfestigkeit, kommt es zu Rissen. Zuschlag und Zementstein weisen ein unterschiedliches Dehnungsverhalten auf. Während der Zementstein nach einer Anfangsdehnung aufgrund der Dehydratation wieder schrumpft, dehnt sich der Zuschlag je nach Art konstant aus (siehe Bild 2.17).

UHPC weist ein thermisches Dehnungsverhalten nahe dem „normalen“ Beton auf (43) (42) (7).

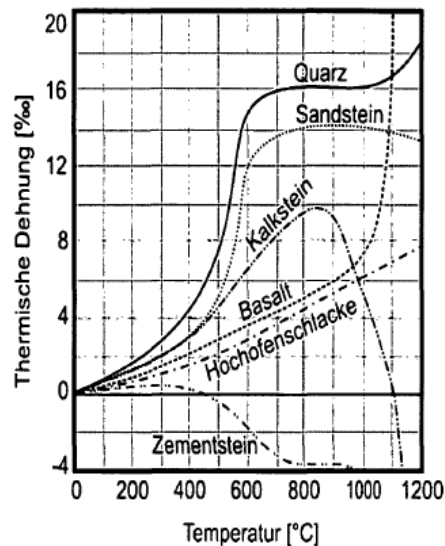


Bild 2.17: Thermische Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur (37)

2.6.4 Thermohydraulische Prozesse

Besonders bei ultrahochfesten Betonen kann es aufgrund intensiver thermischer Einwirkungen zu explosionsartigen Abplatzungen kommen. Wie in Bild 2.18 dargestellt, führt eine starke Wärmebelastung auf der Betonaußenseite zu einem Verdampfen des physikalisch gebundenen Wassers sowie in einem gewissen Ausmaß auch zum Verdampfen des in den Gelporen gebundenen Wassers und des Kristallwassers aus den Zuschlägen (37) (43).

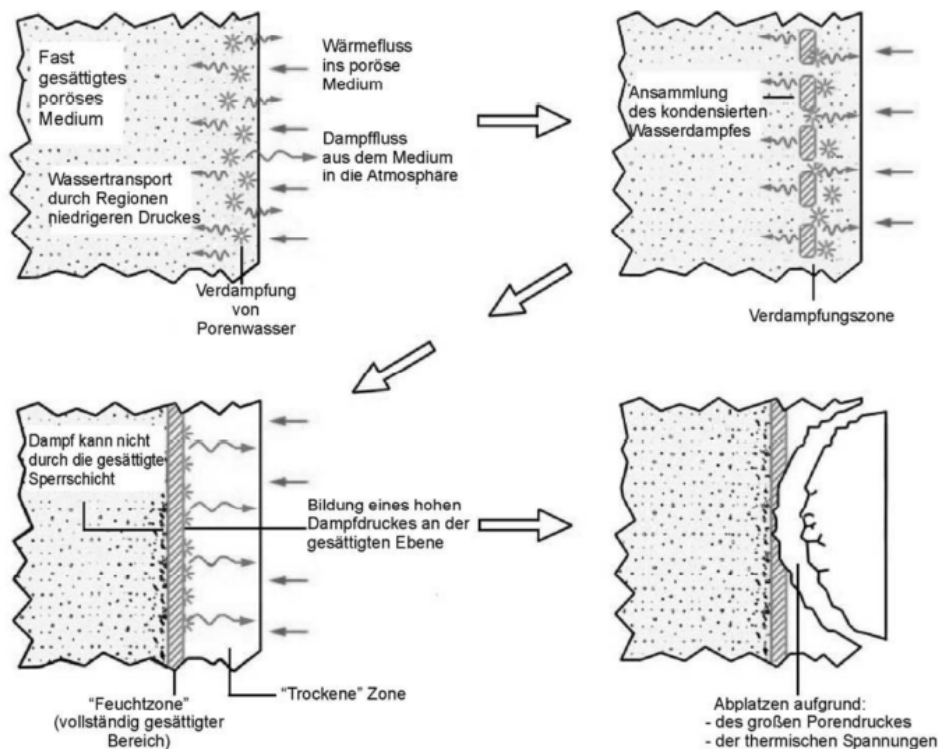


Bild 2.18: Schematische Darstellung der Entstehung von Abplatzungen

Bei diesem Desorptionsvorgang entweicht der Wasserdampf zum Teil entweder durch die Poren des Betons Richtung Außenseite oder in die noch kalten Schichten des Betonkörpers und kondensiert an den Porenoberflächen. Dies kann zu einer Sättigung der Poren führen, die eine weitere Durchströmung in den Querschnittsinnenbereich verhindert. Der restliche Wasserdampf entweicht ausschließlich zur heißen Außenseite. Dies kann den Druck soweit steigern, dass die Betonzugfestigkeit überschritten wird und der Beton plötzlich entweder in Form schalenförmiger Abplatzungen oder zur Gänze explodiert (25) (44) (37). Wie in Bild 2.19 ersichtlich, führen beim UHPC erst wesentlich höhere Temperaturen zum Abplatzen.

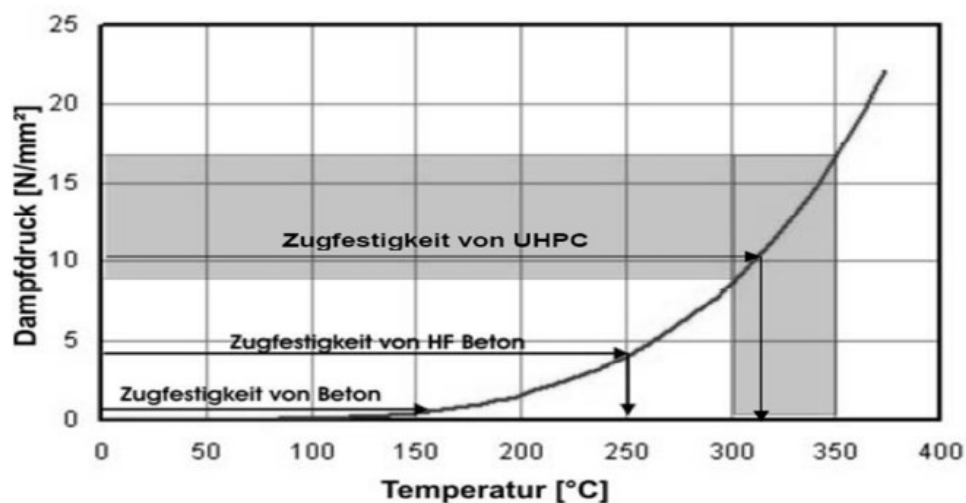


Bild 2.19: Dampfdruck-Kurve (38)

Nichtsdestotrotz ist die Möglichkeit für ein schlagartiges Abplatzen bei ultrahochfesten Betonen aufgrund des sehr dichten Gefüges erhöht (Bild 2.20). „Entscheidend ist neben dem absoluten Wassergehalt auch die Dichtigkeit (Permeabilität) des Betons“. (37)

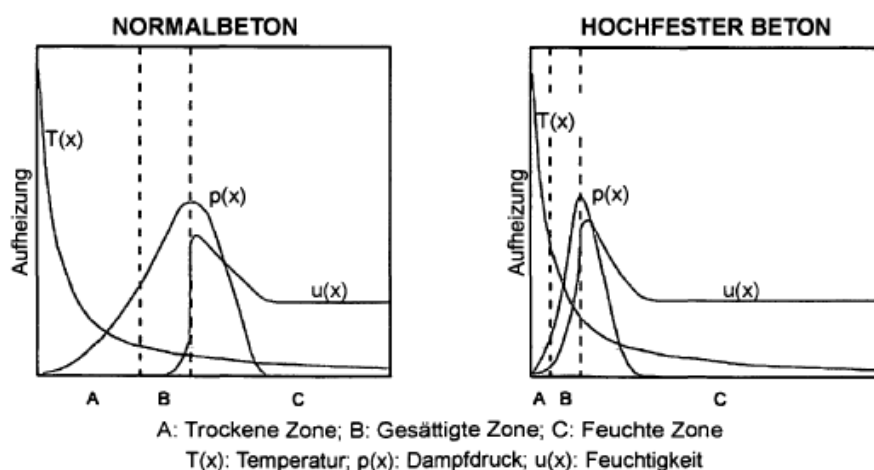


Bild 2.20: Vergleich von Normalbeton und Hochleistungsbeton (37)

Es ist hinzuzufügen, dass obige Beobachtungen immer im Zusammenhang mit Brand und nicht mit reiner Lufttemperatureinwirkung gemacht wurden.

2.7 Granulometrische Eigenschaften von UHPC

2.7.1 Allgemein

Granulometrische Eigenschaften sind von wesentlicher Bedeutung bei der Verbesserung der Eigenschaften von Ultrahochleistungsbetonen. So kann die Optimierung der Packungsdichte, die Verhinderung von Fehlstellen im Betongefüge, sowie eine Reduktion der Matrixporosität und die Steigerung der Gefügehomoogenität auf die Druckfestigkeit einen entscheidenden Einfluss haben (26). Gerade in den letzten Jahrzehnten ist in der UHPC-Forschung die Bedeutung der Zementsteinmatrix und den verschiedenen reaktiven und inerten Feinstpartikeln, die das Frisch- und Festbetonverhalten stark beeinflussen, vermehrt in den Mittelpunkt gerückt. Für ein besseres Verständnis wird in diesem Kapitel auf die Bedeutung der Hauptcharakteristika wie der Porosität und der Packungsdichte beim ultrahochfesten Beton eingegangen.

2.7.2 Porosität

Definition: Die Porosität „stellt das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen eines Stoffes oder Stoffgemisches dar“ (45). Mit Hilfe der Porosität, die stark mit der Dichte zusammenhängt, kann der tatsächlich vorliegende Hohlraumanteil abgeschätzt werden (4 S. 36) (45).

Je nach Anordnung im Gefüge können offene oder geschlossene Poren bzw. geschlossene Sackporen entstehen (siehe Bild 2.21).

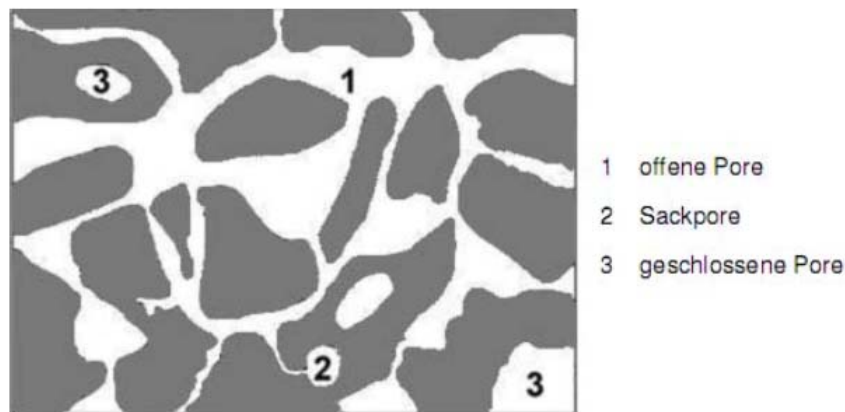


Bild 2.21: Darstellung der Poren in einem porösen Baustoff (26 S. 33)

In der Tabelle 2.4 ist die Einteilung der Poren nach Porengröße nach Setzer dargestellt.

Tabelle 2.4: Unterscheidung von Zementsteinporen nach kapillarem Saugvermögen (26 S. 33)

hydr. Radius R_H	Porenart	Merkmale
< 1 nm	Mikrogelporen	Oberflächenphysik, stark gestört, unter normalen Bedingungen nicht gefrierbar
< 30 nm	Mesogelporen	Übergang von makroskopischen zu oberflächenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten, Gefrierbarkeit unter -23°C, Verdunstung in 50% rel. Feuchte
< 1 µm	Mikrokapillaren	Kapillares Saugen nur über kurze Distanz möglich, großer Kapillardruck, gefrierbar
< 30 µm	Mesokapillaren	durch Reibung verzögertes Saugen über Tage, große Steighöhe in wenigen Tagen, gefrierbar
< 1 mm	Makrokapillaren	sofortiges kapillares Saugen in Sekunden, hohe Beweglichkeit, geringe Steighöhe, gefrierbar
> 1 mm	Grobporen	Poren sind leer

Die Gesamtporosität im ultrahochfesten Beton wird aus den Gel-, Luft- und den Kapillarporen zusammengesetzt (8 S. 46 ff.).

Gelporen haben eine Größe von 0,001 bis 0,01 µm (8 S. 46). Sie bilden sich bei der Entstehung des Zementgels. Nach *Stangl* können sie nicht als Poren im „herkömmlichen Sinn“ definiert werden, da sie „Zwischenräume zwischen den Nadeln der C-S-H-Phasen, und damit Bestandteil der C-S-H-Phasen bzw. Zementgels“ sind (26 S. 33 ff.).

Luftporen, auch Verdichtungsporen genannt, mit einer Größe von > 1 mm können durch einen nicht-vollständigen Verdichtungsprozess hervorgerufen werden (8 S. 47).

Kapillarporen befinden sich im Größenbereich von 0,01 bis 0,1 µm. Befindet sich zu viel Wasser im Zementstein, wird der überschüssige Anteil nicht am Hydratationsprozess eingebunden und folglich nicht in den Gelporen physikalisch gebunden (8 S. 47).

Die Porosität kann mittels Quecksilberdruckporosimetrie gemessen werden (siehe 5.5.1). *Horvath* zeigt mit Hilfe des Verfahrens der Quecksilberdruckporosimetrie Strukturveränderungen von UHPCs bei unterschiedlich hohen Temperaturen auf. Die Untersuchungen zeigten, wie Bild 2.22 zu erkennen gibt, dass im Grünzustand ultrahochfester Beton eine wesentlich geringere Porosität (ca. ein Viertel) aufweist als portlandzementgebundener Mörtel. Jedoch die Reaktionen wie Entwässerung, Sintern,

Umwandlungen und Zersetzungen sind bei Temperatureinwirkung die gleichen. Folglich führt der Temperaturanstieg bei beiden Baustoffen zu einem etwa gleichen Anstieg der Porosität (8 S. 46 ff.).

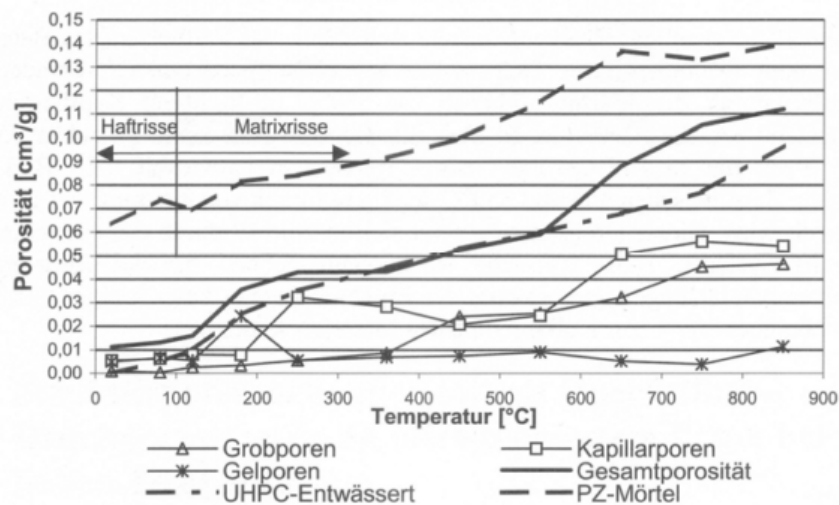


Bild 2.22: Verteilung der Porosität in Abhängigkeit der Temperatur (8 S. 48)

2.7.3 Packungsdichte

Während die Porosität den Hohlraum des Zementsteins beschreibt, ist bei der Packungsdichte das Feststoffvolumen einer Partikelmischung ausschlaggebend. Das Feststoffvolumen ist Teil des Gesamtvolumens, wobei sich das Gesamtvolumen aus Feststoffvolumen und Hohlraumgehalt zusammensetzt (26 S. 35 ff.).

$$D = 1 - \frac{\varepsilon}{100}$$

mit D = Packungsdichte und ε = Hohlraumgehalt in Vol.-%

Formel 2-5: Berechnung der Packungsdichte (22)

Die Packungsdichte (Formel 2-5) stellt eine wesentliche Einflussgröße in Bezug auf die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit von ultrahochfestem Beton dar (46). Zum Beispiel entsteht aufgrund einer hohen Packungsdichte und des damit bedingten geringen Hohlraumanteils ein starkes Festbetongefüge, das folglich zur Festigkeitssteigerung führen kann. Die Packungsdichte wird dann erhöht, wenn die Hohlräume bzw. Zwickelräume zwischen den großen Partikeln mit kleinen Partikeln optimal ausgefüllt werden. Durch vermehrtes Füllen der immer kleiner werdenden Hohlräume mit immer kleiner werdenden Partikeln besteht das Bestreben, sich einer Packungsdichte mit dem theoretischen Grenzwert von $D = 1$ zu nähern.

Dabei wird in der Literatur vorausgesetzt, dass sich alle Partikel unterschiedlicher Größe, wie in Bild 2.23 dargestellt, an mindestens 3 Punkten berühren (26 S. 36).

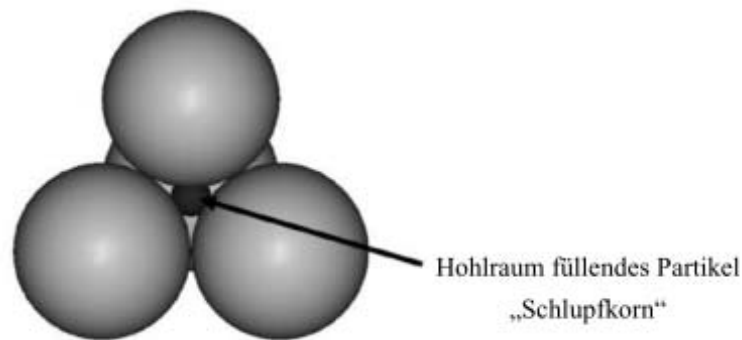


Bild 2.23: Darstellung der Hohlräumfüllung in einem Tetraeder (22)

Die optimal aneinander abgestimmte Kornverteilung ist eine wesentliche Voraussetzung um die Gefügedichtigkeit zu erhöhen (34). Eine Verringerung des Hohlraumgehalts kann vor allem durch das Beimischen von Feinstoffen mit möglichst unterschiedlicher Kornverteilung erreicht werden. Dabei ist besonders auf die Feinheit, das Verhältnis der einzelnen Mischkomponenten sowie die Zusammensetzung der Partikel zu achten (34).

Mit zunehmender Quantität an sehr kleinen Partikeln kommt es zu einem progressiven Anstieg der „inneren Partikeloberfläche des Korngemisches“, die für eine bessere Verarbeitbarkeit der Konsistenz des Zementleimes benetzt werden muss. Weiters beeinflussen bei steigendem Feststoffanteil die interpartikulären Kräfte das rheologische Verhalten. Um eine „optimale Packungsdichte“ zu erhalten, müssen folglich eine Vielzahl an Faktoren berücksichtigt werden: Art, Korngröße, Menge der Partikel sowie neben der Kornverteilung auch die Kornform (34).

Es gibt unterschiedlichste Rechenmodelle zur Optimierung der Packungsdichte, jedoch konnte bisher diese Problematik nur unvollständig auf theoretischem und rechnerischem Weg gelöst werden. So wird – wie bei *Schwanda* – die Korngrößenverteilung der Partikeln und deren Einfluss beachtet, jedoch muss in Bezug auf die Kornform der Partikel, wenn nicht von vornherein von rein glatten Kugelformen ausgegangen wird, mit „Korrekturfaktoren“ gearbeitet werden.

Daher ist nach wie vor – trotz der Weiterentwicklung unterschiedlichster Rechenmodelle – die Modellierung der optimalen Packungsdichte und Partikelzusammensetzung mit umfangreichen und/oder experimentellen Versuchen verbunden (34).

3 Feuerfeste Werkstoffe

3.1 Allgemein

Als feuerfeste Werkstoffe werden im Allgemeinen jene Erzeugnisse bezeichnet, die „bei hohen Temperaturen (etwa 600 bis 2000°C) vor allem in Anlagen der Grundstoffindustrie eingesetzt werden“ (47 S. 1). Sie werden in vier Arten unterteilt: „geformte Erzeugnisse (Steine), ungeformte Erzeugnisse (Bau- und Reparaturmassen, Verfestigungsmittel u.a.), Funktionalprodukte (Konstruktionselemente) und wärmedämmende Erzeugnisse“ (47 S. 1).

In dieser Arbeit wird ausschließlich auf die ungeformten Erzeugnisse wie den Feuerbeton eingegangen.

3.2 Anwendungsbereich

Feuerbetone werden im Allgemeinen wie alle anderen feuerfesten Erzeugnisse in folgenden Bereichen eingesetzt:

- „Auskleidung (Zustellung) von Anlagen für thermische Prozesse (Schmelz-, Brenn- und Wärmebehandlungsanlagen sowie von Transportbehälter)
- der Bau von feuerfesten Konstruktionselementen
- Elemente zur Wärmerückgewinnung (Regeneratoren, Rekuperatoren) und
- Wärmedämmung (47 S. 6).

In der Praxis handelt es sich dabei u.a. um Auskleidungen für Hochöfen in der Rohstahlerzeugung, für Wärmebehandlungsanlagen in der Stahlindustrie, für Schmelzwannen in der Glas-, Aluminium- sowie Kupferindustrie, für Sinteröfen in der keramischen Industrie, für Drehrohre in der Zementindustrie (48 S. 5), für Wärmedämmungen in der petrochemischen Industrie und für unterschiedlichste Prozesse in der chemischen Industrie (49).

Die Verwendung der unterschiedlichen Arten von Feuerbetonen hängt stark von den Einsatzgebieten ab. Dabei sind hauptsächlich folgende Faktoren ausschlaggebend:

- thermische Eigenschaften (Prozesstemperatur und Temperaturwechsel)
- chemisches Reaktionsverhalten (Korrosion)
- mechanische Eigenschaften (Erosion)

Bei jeder Ofenanlage sind bei der Auswahl des Feuerfestmaterials andere Eigenschaften oder deren Kombinationen maßgebend.

Der in dieser Arbeit näher betrachtete Referenzbeton zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Anwendungstemperatur: 1000-1150 °C bei moderater Temperaturwechselbeständigkeit
- geringer chemischer Angriff
- gute Abriebfestigkeit

Diese Eigenschaften sind besonders in folgenden Bereichen nötig:

- Wärmebehandlungsöfen in der Stahlindustrie (Vergütungsöfen)
- Aschenauffangbehälter in Biomasseanlagen
- Auskleidung des Konus im Wärmetauscher der Zementindustrie

Gerade im Bereich der Wärmebehandlungsöfen, konkret beim Einbau in sogenannte Vergütungsöfen der Stahlindustrie, sind die oben genannten Eigenschaften des Referenzbetons nicht ausreichend und eine Steigerung der mechanischen Festigkeiten wird gefordert. Vergütungsöfen dienen dem Härten und dem sogenannten Anlassen des Stahls „bei höheren Temperaturen, um mit dieser Wärmebehandlung das Material mit hoher Festigkeit bei gleichzeitig hohen Zähigkeitseigenschaften zu versehen (50).“

Aufgrund der unterschiedlichen Dicken und Formen der zu vergütenden Stahlblöcke kommt es zu besonderen Ansprüchen an die Aufheiz- und Abkühlkurven sowie die Haltezeiten im Zuge des Heizprozesses. In der Praxis wird für diesen Prozess ein sogenannter Herdwagenofen eingesetzt.



Bild 3.1: Herdwagenofen in der Wärmebehandlung der Stahlindustrie (49)

Ein Herdwagenofen besteht aus einem fixen Ofenraum, in den das zu behandelnde Werkstück mit verschiebbaren Wagen hinein- und herausgeschoben wird. Aufgrund der Notwendigkeit die Ofenanlage im heißen Zustand zu öffnen, kommt es gewöhnlich zu einem starken Temperaturabfall im Ofen. Dieser Umstand führt dazu, dass bei der Auskleidung der Ofenwände und Decken feuerfeste Erzeugnisse mit hoher Temperaturwechselbeständigkeit zur Anwendung kommen

(Hochtemperaturwolle – siehe weiße Materialien im Bild 3.1). Durch die Verwendung dieser leichten Wärmedämmprodukte können auch schnellere Temperaturveränderungen bewerkstelligt werden. Da jedoch die Dämmprodukte nur geringe mechanische Festigkeiten besitzen, wird im Bereich des Ofeneingangs (Ofentür), der Oberfläche zum Ofenwagen und des Übergangs bzw. Anschlusses der Ofenwand an den Ofenwagen ein dichter Feuerbeton, wie z.B. der vorliegende Referenzbeton, eingesetzt (siehe Bild 3.1 und Bild 3.2; entspricht der grauen Flächen). Der Abrieb durch das Ein- und Ausschieben des Ofenwagens, die Belastungen am Türrahmen und die Masse der aufgelegten Stahlteile erfordern hohe Festigkeiten.

In vorliegendem Bild 3.3 ist die Zustellung dieses Ofenwagens schematisch dargestellt.



Bild 3.2: (links) Betonierter Herdwagen (49)

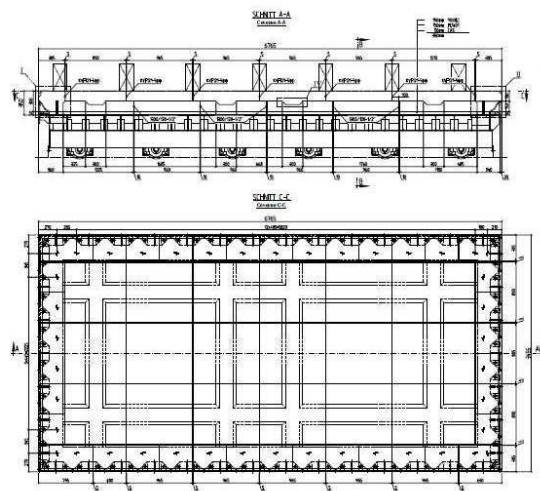


Bild 3.3: (rechts) Konstruktionszeichnung eines Herdwagens (49)

3.3 Technologie feuerfester Betone

3.3.1 Einleitung

Feuerfester Beton, auch Feuerbetone, zählen zur Gruppe der „ungeformten feuerfesten Erzeugnisse“. In der Norm DIN EN ISO 1927-1 werden ungeformte (monolithische) feuerfeste Werkstoffe als Mischungen definiert, „die aus einem Zuschlagstoff und einem oder mehreren Bindemitteln bestehen und die entweder im Anlieferungszustand oder nach Zugabe einer oder mehrerer geeigneter Flüssigkeiten gebrauchsfertig sind“ (51).

Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse werden üblicherweise nicht nach dem Chemismus unterteilt, sondern nach dem Verwendungszweck, der Art der Verarbeitung und der Art des Abbindens (siehe oben: Bindungsarten).

In Bild 3.4 wird die allgemeine Übersicht ungeformter feuerfester Erzeugnisse dargestellt.

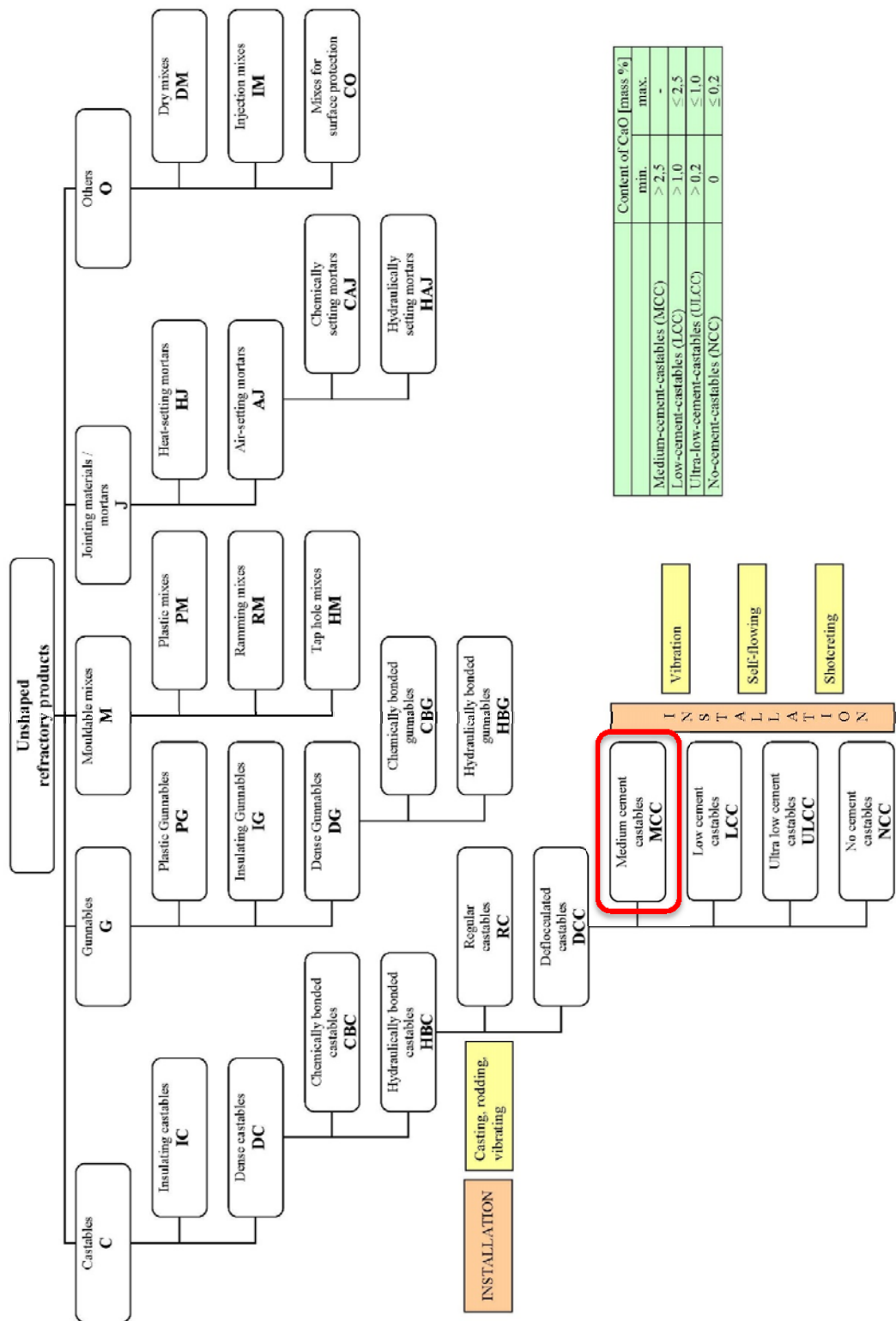


Bild 3.4: Klassifizierung ungeformter feuerfester Erzeugnisse (52 S. 524); Referenzbeton rot eingekreist

In Salmang et.al. (53 S. 762) wird die Unterteilung der Feuerbetone folgendermaßen aufgelistet:

- Feuerbetone:
 - o herkömmliche Feuerbetone
 - o verflüssigte Feuerbetone
 - o chemisch gebundene Feuerbetone
- Spritzbetone
- formbare feuerfeste Massen:
 - o plastische Massen
 - o Ramm-Massen (Stampfmassen)
- feuerfeste Mörtel
- sonstige ungeformte feuerfeste Erzeugnisse:
 - o Trockenmassen
 - o Einpressmassen
 - o Massen für Oberflächenschutz
 - o Stichlochmassen.

Beim Erstarrungsprozess der ungeformten feuerfesten Erzeugnisse spielen die Bindungsarten eine wichtige Rolle. Gemäß DIN EN ISO 1927-1 können folgende Bindungen eintreten:

- hydraulische Bindungen: der Werkstoff erstarrt und erhärtet hydraulisch bei Umgebungstemperatur
- keramische Bindungen: der Werkstoff erhärtet durch das Sintern beim Brand
- chemische Bindungen: der Werkstoff (anorganisch oder organisch-anorganisch) erhärtet aufgrund einer chemischen Reaktion bei Umgebungstemperatur, jedoch nicht durch eine hydraulische Bindung sowie nicht durch Sinterung (keramische Bindung) (51) (53 S. 762 ff.).

Es kann auch zu einer Mischbindung kommen. So weisen phosphatgebundene Erzeugnisse eine chemische und keramische Reaktion auf (47 S. 141). Über 1000°C setzt in allen Fällen die keramische Bindung ein (53 S. 773).

Die in der Literatur unter dem Punkt „Feuerbetone“ angeführten verflüssigten Betone, um den es sich beim Referenzbeton der vorliegenden Arbeit handelt, werden nach dem CaO-Gehalt des Versatzes (im Gegensatz zum Zementgehalt in der Betontechnologie in Tabelle 3.1 folgendermaßen eingeteilt (47 S. 143).

Tabelle 3.1: Klassifizierung der Betone nach dem CaO-Gehalt

Gruppe	Bezeichnung	CaO-Anteil [%]	
		min	max
MCC	Medium cement castable	> 2,5	-
LCC	Low cement castable	> 1,0	≤ 2,5
ULCC	Ultra low cement castable	> 0,2	≤ 1,0
NCC	No cement castable	0	≤ 0,2

Verflüssigte Betone müssen mindestens einen Verflüssiger und 2 Gew.-% ultrafeine Partikel (<1µm) gemäß DIN 1402-1 enthalten. Somit kann ein ULC-Feuerbeton mit einem 80%igen Tonerdezement und ohne CaO-Verunreinigung in den Zuschlagsstoffen einen Zementanteil von 5% aufweisen, um einen CaO-Anteil kleiner 1% zu haben (47 S. 142).

Um eine Gegenüberstellung zu ultrahochfestem Beton (siehe Kapitel 2.3) darstellen zu können, wird im nächsten Schritt auf die Zusammensetzung der Feuerbetone nach den einzelnen Ausgangsstoffen und Rohstoffen eingegangen.

3.3.2 Zusammensetzung

Je nach Anwendungsbereich und Einsatzgebiet können die Ausgangsstoffe der Versätze stark variieren (siehe Kap. 33. Anwendungsbereich). In dieser Arbeit wird versucht, einen Vergleich mit der Betontechnologie (vergleiche Kapitel 2.3) herzustellen. Es wird auf folgende Bestandteile von Feuerbetonen eingegangen:

- Gesteinskörnung (in der Feuerfesttechnologie: Rohstoffe)
- Bindemittel (u.a. Zement)
- Zusatzstoffe
- Zusatzmittel
- Wasser
- Fasern.

Im Gegensatz zu konventionellen Betonen, bei denen Zement die bedeutendste Komponente darstellt, beeinflussen in der Feuerfesttechnologie die Rohstoffe (Gesteinskörnung) die Eigenschaften des Betons.

3.3.2.1 Zuschläge

Im Unterschied zur Betontechnologie werden die Gesteinskörnungen in der Feuerfesttechnologie als Rohstoff bezeichnet. Die gesamten Feuerfesterzeugnisse basieren im Allgemeinen auf sechs Rohstoffen, die in reiner Form oder als deren Gemisch auftreten können. Bei diesen sechs Grundoxiden handelt es sich um Silika (SiO_2), Alumina oder auch Tonerde genannt (Al_2O_3), Magnesia (MgO), Calcia oder Calciumoxid (CaO), Chromia oder Chromoxid (Cr_2O_3), Zirkonia oder Zirkonoxid (ZrO_2) unter fallweiser Einbindung von Kohlenstoff (C) (47 S. 2) (siehe Bild 3.5).

Da diese Rohstoffe meist „natürlich vorkommende mineralische Rohstoffe“ sind, können sie auch noch sogenannte Flussmittel (als chemische Formel: Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , TiO_2) als Verunreinigungen enthalten (47 S. 23, 40).

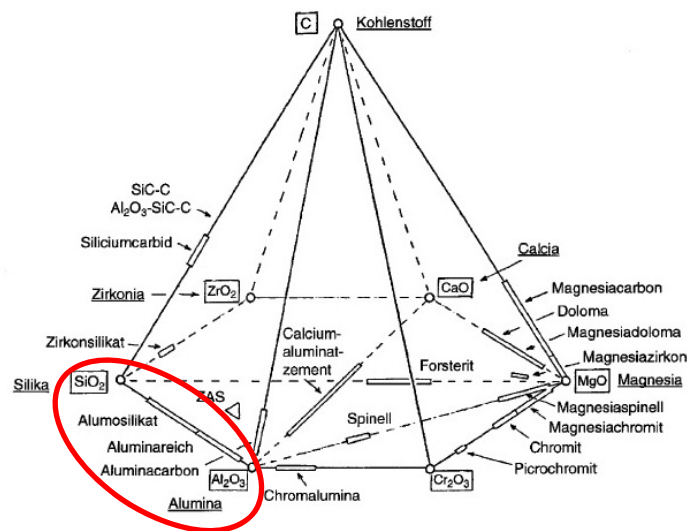
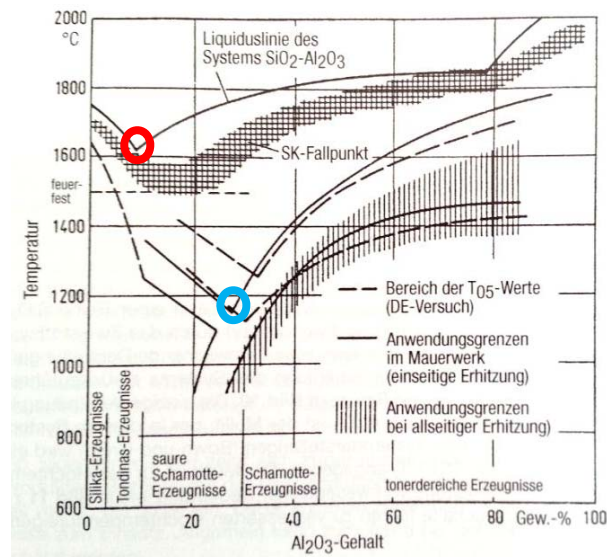


Bild 3.5: Grundstoffpyramide feuerfester Werkstoffe (47 S. 2)

Je nach eingesetztem Oxid können beim Endprodukt unterschiedliche Eigenschaften bewirkt werden. Aufgrund des in dieser Arbeit untersuchten Referenzbetons (siehe Kapitel 4), dessen Rezeptur auf Silika und Alumina basiert, wird in dieser Arbeit ausschließlich auf diese beiden Rohstoffe eingegangen. Der prozentuelle Anteil von Silika und Alumina beeinflussen das Hochtemperaturverhalten eines Feuerbetons maßgeblich. Im Bild 3.6 erkennt man die Anwendungsgrenztemperatur in Abhängigkeit der reinen Silika- und reinen Aluminaanteile. In einem reinen Zweistoffsystem gibt es bei steigendem Aluminagehalt und sinkendem Silikagehalt ein Schmelzpunkt-Minimum bei 90:10.



Roter Kreis = Schmelzpunktminimum

Blauer Kreis = Minimum der Anwendungsgrenztemperatur

Bild 3.6: Hochtemperaturverhalten von Werkstoffen im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -System (54 S. 560)

Betrachtet man jedoch die Anwendungsgrenztemperatur von Alumina und Silika, wie sie bei Feuerfestprodukten zur Anwendung kommen, verschiebt sich das Verhältnis zu 70:30, was bereits auf geringe Mengen der oben erwähnten Verunreinigungen (Flussmittel) zurückzuführen ist (54 S. 560). Dabei treten erste Schmelzphasen nicht erst bei 1590 $^{\circ}\text{C}$ auf, sondern je nach Fremdkomponente weit früher auf: TiO_2 (ab 1480 $^{\circ}\text{C}$), Fe_2O_3 (ab 1250 $^{\circ}\text{C}$), Na_2O (ab 1050 $^{\circ}\text{C}$), K_2O (ab 985 $^{\circ}\text{C}$) sowie CaO (ab 1345 $^{\circ}\text{C}$) (47 S. 40). Letzteres ist auch der Grund, warum in der Feuerfestindustrie der Zementanteil im Beton gering gehalten wird.

In folgendem Abschnitt werden alle Rohstoffe auf Basis des $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Systems wie Silika, Schamotte, und hochtonerdereiche Rohstoffe beschrieben.

Silika

Silika ist ein Rohstoff, der in der Natur als β -Quarz-, β -Cristobalit- und γ -Tridymit-Mineral vorkommt (47 S. 169)². Diese erfahren unter Temperatursteigerung sogenannte Modifikationsänderungen, die in nachfolgender Tabelle 3.2 detailliert dargestellt werden.

² Im Feuerfestbereich wird α als die höchste mineralogische Form bezeichnet, in der Betontechnologie dagegen beschreibt α die Grund- oder Ausgangsform des Minerals.

Tabelle 3.2: Längen- und Raumänderung von Silika unter Temperaturbeanspruchung (55 S. 171)

Temperatur °C	Umwandlungsstufe	Längenänderung %	Raumänderung %
117 bis 163	$\gamma \rightleftharpoons \alpha$ -Tridymit	+ 0,17	+ 0,50
200 bis 210	$\beta \rightleftharpoons \alpha$ -Cristobalit	+ 1,00	+ 2,00 bis 2,80
575	$\beta \rightleftharpoons \alpha$ -Quarz	+ 0,26 bis 0,45	+ 0,86 bis 1,30
870	α -Quarz $\rightarrow$ α -Tridymit	+ 5,55	+ 14,4
1250	α -Quarz $\rightarrow$ α -Cristobalit	+ 6,60	+ $\sim$ 17,4
1470	α -Tridymit $\rightarrow$ α -Cristobalit	+ 1,05	—
1670	α -Tridymit $\rightarrow$ Schmelze	+ 1,05	—
1713	α -Cristobalit $\rightarrow$ Schmelze	—	+ $\sim$ 0,1

Einige Modifikationen sind reversibel ($\leftrightarrow$) und andere irreversibel ($\rightarrow$). Solange Volumsveränderungen mit steigender Temperatur irreversible sind, können diese mit einem Vorbrand der Zuschlagstoffe vorweggenommen werden. Die reversiblen Modifikationsänderungen treten in jedem Fall auf und müssen daher in der Anwendung besonders berücksichtigt werden. Wichtigste Temperaturgrenze für Silika-Produkte ist 573°C (600°C). Unterhalb ist beim Aufheizen oder Abkühlen mit signifikanten Dehnungen und damit hoher Empfindlichkeit auf Temperaturwechsel zu rechnen (55 S. 175). Oberhalb der Grenze zeichnen sich Silika-Produkte durch eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit und minimale Wärmedehnung aus. Darüber hinaus sind sie sehr korrosionsbeständig gegen saure Schmelzen. Reduzierende oder Wasserstoff-Atmosphären führen dagegen zu einer Zerstörung des Gefüges (47 S. 35 f.).

Schamotte

Schamotte ist die Bezeichnung für gebrannten Ton. Das Korn unterliegt einer hohen Schwindung unter Temperatureinfluss, welche durch einen Vorbrand vorweggenommen wird und damit ein weitgehend stabiles Material hergestellt wird (55 S. 331). Tone werden vorwiegend in Drehrohröfen und Tunnelöfen bei 1200 bis 1500°C zu Schamotte gebrannt (47 S. 45).

Die Hauptmineralphasen der Schamotte sind Mullit, Cristobalit und eine Glasphase (47 S. 23). Bei niedrigen Al_2O_3 - und hohen Alkali-Anteilen ist der Anteil der Glasphase hoch (55 S. 497). Letztere führt zwar zu einer guten Kaltdruckfestigkeit, sie reduziert aber die Feuerfestigkeit ab 1000°C signifikant (47 S. 46).

Schamotte besteht aus 10 bis 45% Al_2O_3 (47 S. 43). Aufgrund der natürlichen Rohstoffbasis von Ton ist in Schamotte ein Gehalt von Fe_2O_3 bis maximal 3%, und von Alkalien (vor allem K_2O und Na_2O) bis zu 3% enthalten (55 S. 491). Die offene Porosität erreicht maximal 21%, die Kaltdruckfestigkeit

schwankt je nach Herstellungsart beim Schamotteprodukt bis zu 90 N/mm² (47 S. 44). Mehr Details sind in der nachstehenden Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Eigenschaften von Schamottesteinen (47 S. 44)

Werkstoff-sorte	Al ₂ O ₃ [%]	Kaltdruckfestigkeit [N/mm ²]	Druckerweichen T ₀₅ [°C]	Temperaturwechselbeständigkeit bei Wasserabschreckung [n]
A 25 t	20-30	35-90	1260	5-15
A 30 t	30-35	30-50	1340	15-20
A 35 t	35-40	30-50	1360	15-20
A 40 t	40-45	40-70	1380-1450	20-25

Für den Anstieg der Kaltdruckfestigkeit im Bereich von 40 bis 45% Al₂O₃ trotz Reduktion der Glasphase ist der höhere Anteil an Mullit verantwortlich.

Aufgrund der ausreichend vorhandenen Tonlagerstätten, der günstigen Rohstoffpreise und ihrer besonderen Eigenschaften ist Schamotte als das Standardprodukt im Feuerfestbereich anzusehen (54 S. 561).

Hochtonerdehaltige Rohstoffe

Bei einem Al₂O₃-Anteil von über 45% spricht man von hochtonerdehaltigen Materialien. Diese Gruppe besteht aus unterschiedlichsten Mineralien, nämlich den Tonerdesilikaten, Tonerdehydraten, Mullit und Alumina, die sowohl natürlich vorkommen als auch synthetisch hergestellt werden können.

Tonerdesilikate bestehen aus Andalusit, Cyanit und Silimanit. Diese drei natürlich vorkommenden Minerale entstehen unter hohem Druck in Schieferzonen. Unter Normaldruck und höheren Temperaturen wandeln sich diese Minerale in Mullit um. Dabei kommt es zu einer Volumszunahme. Die spezifischen Eigenschaften sind in nachfolgender Tabelle detailliert dargestellt (55 S. 596).

Tabelle 3.4: Umwandlung der Mineralien der Silimanitgruppe beim Erhitzen in Mullit (55 S. 596)

Mineral	Spezifisches Gewicht vor dem Brennen [g/cm ³]	Volumsvergrößerung [%]	Beginn der Mullitkristallisation [°C]
Cyanit	3,5 bis 3,6	16 bis 18	1325
Andalusit	3,1 bis 3,2	3 bis 6	1350
Silimanit	3,23 bis 3,25	7 bis 8	1530

Die Sillimanitgruppe zeigt ein gutes Druckfließen und eine gute Temperaturwechselbeständigkeit. Weiters ist sie das alkalioxidbeständigsten Mineral der Hochtonerde-Gruppe (47 S. 51).

Zu der Gruppe der Tonerdehydrate zählen Diaspor, Böhmit und Hydrargillit. Alle drei Komponenten kommen im Bauxit vor. Die Besonderheit dieser Minerale ist die Einbindung von Wasser in die Kristallstruktur. Bis etwa 600°C wird das Wasser unter hohen Schwindungen fast zur Gänze abgegeben. Im Bereich von 1140 bis 1500°C kommt es durch die Abnahme der Porosität und der Erhöhung des spezifischen Gewichtes zu einer zusätzlichen Schwindung von etwa 22,6%. Daher ist ein Vorbrand des Rohstoffes unbedingt notwendig (55 S. 602). Dieser Schwindung im höheren Temperaturbereich kann im Feuerbeton auch durch eine gezielte Mullitisierung (Kornwachstum aufgrund der Entstehung von Mullit) entgegengewirkt werden. Bauxite sind nicht CO-beständig (47 S. 51).

Bauxit ist im Vergleich zu anderen hochtonerdehaltigen Rohstoffen relativ preiswert. Für feuerfeste Anwendungen ist es nur mit Eisengehalten (Fe_2O_3) kleiner 4% und geringen Mengen an Titan (TiO_2) brauchbar (55 S. 607). Im Augenblick gibt es weltweit nur zwei Lagerstätten, die diese Kriterien erfüllen.

Mullit ist eine stabile Mineralphase mit einer chemischen Zusammensetzung von 72% Al_2O_3 und 28% SiO_2 (chemisch Formel: $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) (55 S. 368). In der Regel wird Mullit aus einem Gemisch von Silika und Alumina in einem Sinter- oder Schmelzprozess hergestellt (54 S. 256). Schmelzmullit hat einen leicht höheren Al_2O_3 -Anteil und ist meist reiner als Sintermullit. Ebenso wie schon unter den vorangegangenen Rohstoffen immer wieder angesprochen bildet sich Mullit auch beim Brand aus den Rohstoffen (Tone) oder erst in der Anwendung (54 S. 559).

Mullitprodukte sind bis zu Temperaturen von 1750°C einsetzbar (47 S. 52). Sie zeichnen sich durch eine geringe Wärmedehnung und damit gute Temperaturwechselbeständigkeit aus (54 S. 256).

Tonerde ist ein anderer Begriff für die chemische Bezeichnung „Aluminiumoxid“ und die mineralische Bezeichnung „Korund“. In der Feuerfesttechnologie wird gerne von „Alumina“ gesprochen. Reines Aluminiumoxid kommt natürlich als das Mineral Korund vor. Synthetisch wird es in drei Sorten hergestellt: die kalziierte Tonerde, der Sinter- und der Schmelzkorund (55 S. 609).

Alle Sorten zeichnen sich durch eine hohe Temperaturbeständigkeit bis 1750°C auch unter korrosiver Atmosphäre (CO , Wasserstoff) aus (47 S. 52). Auch die Härte und die geringe elektrische Leitfähigkeit des Korundes ist für die Anwendung von Bedeutung (54 S. 198).

Wie nachfolgende Tabelle 3.5 anschaulich darstellt, ist Korund härter aber dafür auch spröder als Mullit.

Tabelle 3.5: Bestimmte Eigenschaften von Mullit und Korund (54 S. 562)

Eigenschaften	Mullit	Korund
Schmelzpunkt [°C]	1830	2050
Dichte [g/cm ³]	3,2	3,69
Thermische Dehnung [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	4,5	8
Festigkeit [MPa]	200	500

3.3.2.2 Bindemittel (u.a. Zement)

In der Feuerfestindustrie werden folgende Stoffe zu den Bindemitteln gezählt: Zement, Ton und andere Bindersysteme.

Ton ist der Ausgangsstoff für Schamotte und basiert grob gesprochen auf denselben chemischen und mineralogischen Komponenten. Tonminerale sind sehr feinkörnig. Bei Zugabe von Wasser verhält sich Ton plastisch. Diese Bindewirkung resultiert aus der Kornform, aus den Kapillarkräften zwischen Mineral und Wasser sowie den elektrochemischen Reaktionen (Adsorptionsverhalten) im Ton (55 S. 343). Dadurch entsteht schon nach dem Trocknen eine Grundfestigkeit. Die keramische Bindung setzt bei einem Brand ab 1000°C ein. Die Flussmittel können eine Schmelzphasenbildung und damit eine Sinterung beschleunigen (47 S. 28). Im vorliegenden Referenzbeton ist Ton nicht enthalten.

Der Zement der Feuerfestbetone entspricht nicht jenen konventioneller Betone bzw. UHPCs. Im Gegensatz zu den Zementsorten in der Bauwirtschaft mit Tonerde-Anteilen von maximal 14% sind im Feuerfestbereich Anteile über 37% Standard. Daher werden diese Zemente auch als Tonerdezemente bezeichnet (FW, S.28).

Der wesentliche Unterschied eines Tonerdezements zum Portlandzement besteht im Hydratationsprozess. Die Hydratation bewirkt bei Temperaturen unter 40°C eine temporäre hohe Festigkeit, die nach einiger Zeit auf ein niedrigeres stabiles Festigkeitsniveau absinkt. „Dieser als Konversion bekannte Vorgang ist auf eine unvermeidliche und unumkehrbare Umwandlung der Hydrate im Zementstein, verbunden mit einem Anstieg der Porosität, zurückzuführen“ (56). Werden Mörtel und Betone erhitzt, kann das gebundene Hydratwasser abgegeben werden ohne eine sprunghafte Gefügeänderung während der Dehydratation zu verursachen. Eine keramischen Bindung und in der Folge ein erneutes Ansteigen der Festigkeit setzt je nach geeigneten Zuschlägen bei einer Temperatur von 1000°C ein (56).

Neben den zwei oben beschriebenen Bindern gibt es noch eine Vielzahl von anderen Bindersystemen: Phosphate, Sulfate, Wasserglas, Phosphorsäure, Alu- bzw. Kieselsol, u.v.m. (47 S. 28).

3.3.2.3 Zusatzstoffe

Wie bei der Herstellung von UHPC haben die Zusatzstoffe eine vielfältige Aufgabe wie eine Erhöhung der Fließfähigkeit des Feuerbetons (feinste Silika bzw. Tonerden), eine Verbesserung der Bindematrix (reaktive Tonerden) sowie eine Optimierung der Korrosionsbeständigkeit (Bariumsulfat gegen flüssiges Aluminium, nicht-oxidische Pulver gegen Metallschmelzen) (47 S. 30).

Im Referenzbeton werden Mikrosilika verwendet.

3.3.2.4 Zusatzmittel

Die Zusatzmittel entsprechen den Definitionen der Bauwirtschaft (siehe Kapitel 2.3.1.5).

Da die Geschwindigkeit des Abbindens aufgrund der geringen Zementanteile, der komplexen Zuschlagsstoffe sowie der Begebenheiten auf der Baustelle (-30 bis +50°C) sehr unterschiedlich sein kann, werden bei Feuerbetonen immer Zusatzmittel verwendet (47 S. 152).

Als Beschleuniger werden Lithiumsalze, Natriumaluminat sowie Nitrate verwendet (57).

Der bekannteste Verzögerer ist Zitronensäure. Weiters werden auch noch Borate und Carbonate verwendet (57).

Für den vorliegenden Referenzbeton kommt Zitronensäure als Verzögerer zum Einsatz.

3.3.2.5 Wasser

Wasser hat einen bedeutenden Einfluss auf die Betongüte. Dabei ist wie bei der Herstellung von UHPC nicht nur die Güte des Wassers (Trinkwasser-Qualität) oder die Temperatur (Raumtemperatur) sondern vor allem die Menge des Anmachwassers zu beachten.

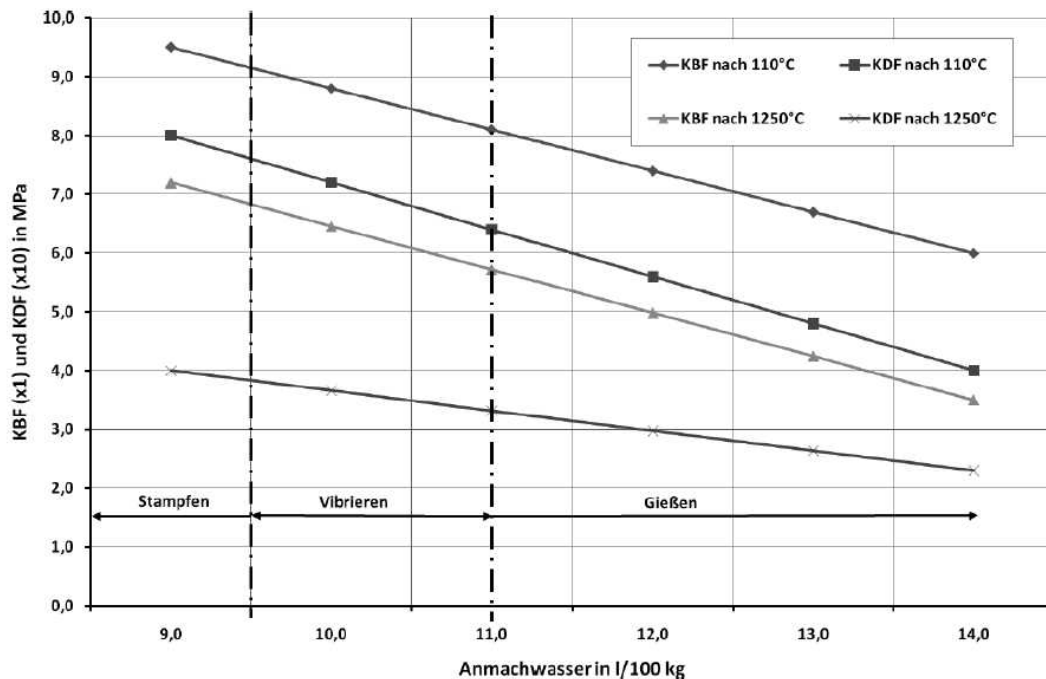


Bild 3.7: Kaltbiegefestigkeit und Kaltdruckfestigkeit in Abhängigkeit der Anmachwassermenge (58 S. 24)

Anschaulich ist die Veränderung der Kaltbiegefestigkeit und Kaltdruckfestigkeit in Bild 3.7 bei zu wenig und zu viel Wasser dargestellt. So kann sich die KDF um 50% und die KBF um 30% reduzieren. Weitere Nachteile sind längere Abbindezeiten, höhere Schwindungen und veränderte Porositäten (47 S. 158).

3.3.2.6 Fasern

Bei Feuerbetonen werden sowohl keramische, organische als auch metallische Fasern eingesetzt. Im Gegensatz zur „konventionellen“ Betontechnologie übernimmt die Faser neben der Verbesserung der Biegezugfestigkeit eine Vielzahl an Aufgaben.

Organische Fasern

Vor allem bei Feuerbetonen mit einer sehr dichten Gefügestruktur kann es bei Temperaturen während der Aufheizphase (siehe Kapitel 3.4.4 Der Aufheizprozess) von 150°C bis 250°C zu explosionsartigen Zerstörungen des Materials kommen. Sobald die Spannungen, die durch den Entwässerungsvorgang hervorgerufen werden, die Zugfestigkeit des Gefüges des Feuerbetons überschreiten, „explodiert“ der Zementstein schlagartig. Organische Fasern (oder Polypropylenfasern) können den Vorgang des Verdampfens unterstützen bzw. eine Zerstörung verhindern. „Bereits unterhalb des Siedepunktes des Wassers schwinden die Fasern, lösen sich bei

weiterer Temperatursteigerung auf und erleichtern so die Entdampfung des Bauwerkes.“ Je länger die Faser und je dünner der Durchmesser bezogen auf die gleichen Gewichtsanteile ist, umso wirksamer wird das Resultat. Ihr Anteil an der Trockenmasse beträgt ca. 0,1% um weder die Festigkeit noch die Porosität des Feuerbetons nachteilig zu beeinflussen (47 S. 170 ff.).

Metallische Fasern:

Stahlfasern werden – im Gegensatz zum „konventionellen“ Beton – bei Feuerbetonen zur Verbesserung der Temperaturwechselbeständigkeit eingesetzt. Sie übernehmen die Funktion eines „Rissstoppers“ indem sie bei Bruch das Gefüge zusammenhalten. Je nach Stahlfaserlegierung ist ein Einsatz bis zu 1200°C möglich. Zu beachten ist, dass durch Zufügen der Fasern die Eigenschaften des Feuerbetons teilweise verändert werden (siehe Tabelle 3.6). Übliche Längen der Stahlfasern sind ca. 25 mm und mit einem Durchmesser von 0,4 mm. Der Gewichtsanteil an der Trockenmasse beträgt ca. 3% (47 S. 171 ff.).

Tabelle 3.6: Veränderungen der Feuerbetoneigenschaften durch Beigabe von Stahlfasern (47 S. 171)

Eigenschaft	Veränderung
Anmachwasser	geringfügig höher (0,1 – 0,2 l/100 kg)
Konsistenz, Fließverhalten	schwieriger
Rohdichte	nicht signifikant
Porosität	nicht signifikant
Biegefestigkeit	positiv
Druckfestigkeit	nicht signifikant
Abriebfestigkeit	nicht signifikant
Temperaturwechselbeständigkeit	positiv (Thermoschockbruchverhalten!)
Wärmeleitfähigkeit	nicht signifikant
Irreversible Längenänderung	Neigung zum Wachsen (je nach Fasertyp)
Reversible Längenänderung	höhere Ausdehnung (je nach Fasertyp)
CO-Beständigkeit	– keine Veränderungen bei Cr-Ni-Stählen – Verschlechterung bei Kohlenstoffstahl

Keramische Fasern

Keramische Fasern wurden als Ersatz von Stahlfasern entwickelt, da letztere bei einer Temperatur von 1200°C ihre thermische Grenze erreicht haben. Es gibt glasige und polykristalline Fasern, die vor allem in der Feuerfestindustrie bei Dämmprodukten wie Matten, Modulen oder vakuumgeformte Bauteile eingesetzt werden. Weiters werden „keramische Stifte“ aus Ton, mullitischen Rohstoffen oder Tonerden (Al_2O_3) per Strangpresse hergestellt und gebrannt. Es konnten sich jedoch weder die Fasern noch die Stifte durchsetzen. Beide reagieren bei hohen Temperaturen mit den Stoffen der Zementmatrix und verlieren ihren erwünschten Armierungseffekt, indem sie die Eigenschaften eines regulären Zuschlagsstoffes übernehmen. Weitere Komplikationen gibt es beim Mischen der Fasern und Stifte wie z.B. die Selbstzerkleinerung. „Keramische Stifte“ haben eine Länge von mehreren Millimetern, keramische Fasern von ca. 2-5 μm (47 S. 172).

3.4 Der Mischprozess

3.4.1 Herstellung in der Produktion

Wie in der UHPC-Technologie hat die Verarbeitung auf die Langlebigkeit und Güte der Feuerbetone sowie ihrer Eigenschaften einen wesentlichen Einfluss.

Die trockenen Ausgangsstoffe werden in der Produktion mit einem Eirich-Mischer (Intensivmischer) vermischt und in Säcken verpackt an die Baustelle geliefert (Beschreibung des Eirich-Mischers siehe Kapitel 2.4.3). Genauere Vorgänge werden in der Literatur nicht beschrieben und zählen – wie der Aufbau der einzelnen Versätze – zu internem Wissen der Produktionsbetriebe.

3.4.2 Verarbeitung auf der Baustelle

Auf der Baustelle erfolgt das Mischen der Trockenmasse mit dem Anmachwasser im Regelfall mit Zwangsmischern. Je nach Höhe des Zementgehalts beträgt die Mischzeit 2 Minuten bis 4 Minuten (siehe Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7: Vorschläge für Mischer, Mischzeiten und Verarbeitungstechniken (47 S. 151)

	Isolierende Feuerbetone		Dichte Feuerbetone				
	Rohdichte < 1,2 g/cm ³	Rohdichte > 1,2 g/cm ³	RC	MCC	LCC	ULCC	NCC
Freifallmischer	ja	möglich	möglich	Nein	nein	nein	nein
Zwangsmischer	nein	möglich	ja	Ja	ja	ja	ja
Mischzeit nach Wasserzugabe (Minuten)*	2	2	2–3	> 3	≥ 3	≥ 4	≥ 4
Empfohlene Verarbeitungstechnik: Schütten, Gießen	nein	nein	möglich	nein	nein	nein	nein
Stochern	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein
Vibrieren	nein	möglich	ja	ja	ja	ja	ja
Selbstfließen **)	nein	nein	nein	möglich	möglich	möglich	möglich

* Im Falle einer 2-Komponentenlieferung sind die beiden Komponenten zunächst mindestens 1 Minute lang trocken vorzumischen

** Ob ein Feuerbeton selbstfließend ist, muss der Hersteller angeben; in keinem Fall mit zu viel Wasser auf eigene Faust versuchen, ein Selbstfließen herbeizuführen!

Im Allgemeinen wird der Beton mit „Gießen, Stochern, Vibrieren oder Selbstfließen“ (Gießen ohne Vibration) verarbeitet, in manchen Fällen durch Stampfen. (47 S. 150). Wie bei der UHPC-Technologie werden zum Verdichten der Betonmasse Vibratoren verwendet, wobei auf die Konsistenz des Feuerbetons besonders geachtet werden muss. Um nicht die Eigenschaften des Feuerbetons negativ zu beeinflussen, sollte der Feuerbeton auf keinen Fall mit ungeeigneter Rüttelflasche verarbeitet werden, sondern ein geeigneter Rüttler dem Feuerbeton und der Wandstärke angepasst werden (47 S. 150 ff.).

Im Vergleich zu UHPC hat die Umgebungstemperatur einen wesentlichen Einfluss auf das Mischen des Feuerbetonversatzes und in der Folge auf die Betoneigenschaften. Bei Temperaturen um den Gefrierpunkt verlangsamt sich der exotherme Abbindeprozess. Die Anfangs- und Endfestigkeiten reduzieren sich und je nach Zementanteil verlängern sich die Ausschaltungszeiten. Um dieser Problematik in der Praxis entgegenzukommen, werden im Handel „Sommer“- und „Winter“-Varianten angeboten (47 S. 150 ff.).

Als weitere Einbaumethode von Feuerbetonen gibt es das Trockenspritz- und Nassspritzverfahren („Shotcreting“).

Beim Trockenspritzverfahren wird der trockene Feuerbeton von einer Spritzmaschine mit Druckluft zum Düsenmischkörper gefördert. Dort wird per Handhebel das Wasser zugegeben und aus der Düse auf die Wand geschleudert, wo die Verdichtung aufgrund der Aufprallenergie der Grobkörner

passiert (59 S. 214). Nachteilig an diesem Verfahren ist der hohe Masseverlust durch den Rückprall (59 S. 38).

Das Nassspritzverfahren ist aus dem Tunnelbau bekannt und wegen der Maschinenkosten erst langsam in den Feuerfestbereich übernommen worden (59 S. 215). Beim Nassspritzverfahren erfolgt die Wasserzugabe bereits in der Pumpe. An der Düse wird nur mehr der Abbindebeschleuniger zugegeben, der den Rückprall und damit den Materialverlust stark reduziert (59 S. 217). Generell zahlt sich das Nassspritzverfahren nur bei großen Lieferungen aus, da im Vergleich zum Trockenspritzverfahren die Technologie sehr aufwendig ist.

3.4.3 Fertigteile

Feuerbetone können auch als Fertigteile hergestellt und vertrieben werden. Je nach Größe, Art und Einsatzbereich reicht die Auswahl über ein breites Spektrum von geometrisch komplizierten kleinen Ofendetails bis zu großflächigen Elementen für Seitenwände und Decken. Durch thermische Vorbehandlung der Fertigteile können diese sofort eingesetzt und in Betrieb genommen werden, wodurch der Aufwand in Form von Ausschalen und Zustellen sowie das langsame Aufheizen zur Entfeuchtung des Feuerbetons weg fällt. Die Verwendung von Fertigteilen reduziert Fehler bei der Verarbeitung, da unter anderem die Ein- und Ausschalzeiten sowie die Abbindezeiten bei der Vorort-Montage entfallen (47 S. 172).

3.4.4 Aufheizprozess

Einen wichtigen Schritt beim Einsatz von Feuerbetonen stellt die Aufheizphase dar. Die korrekte Vorgehensweise hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Endproduktes. Mangelnde Ventilation und Durchlüftung bis zur Inbetriebnahme (dem Aufheizen der Ofenanlage) können zu hoher Luftfeuchtigkeit führen, die aufgrund alkalischer Hydrolyse die Karbonatisierung des Betonsteins zur Folge hat und damit eine starke Verminderung der Betonfestigkeit. Generell wird empfohlen sofort nach Zustellung und Einbau den Feuerbeton auszuheizen.

Beim Aufheizprozess gibt es für den Feuerfestbereich einige Besonderheiten. Aufheizgeschwindigkeit, Haltepunkte sowie Temperatur werden vom verantwortlichen Ingenieur je nach Anlage individuell geregelt. Es gilt, sich genauestens an die Informationen und Anforderungen der Hersteller zu halten, da – wie beim ultrahochfesten Beton – sprunghafte Veränderungen im Gefüge zu explosionsartigen unerwünschten Zerstörungen des Zementsteins oder aufgrund der

Dichtheit des Materials zu Dampfexplosionen im Material führen können. In Bild 3.8 ist ein Beispiel einer Aufheizkurve dargestellt.

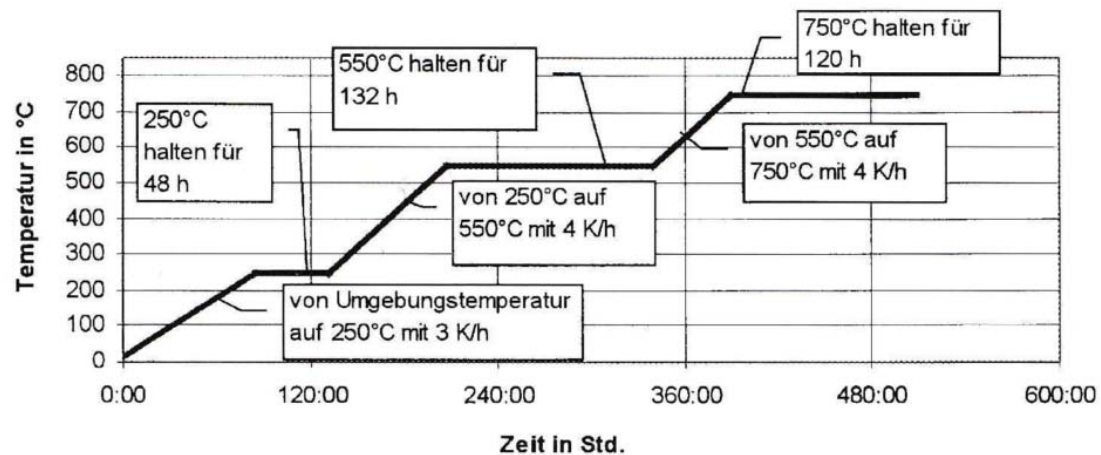


Bild 3.8: Typische Trocknungskurve für Aluminium-Schmelzöfen (59 S. 325)

Trocknungskurven können je nach Ofengröße und Art sowie Dicke und Schichtaufbau des Mauerwerks voneinander abweichen. Den ersten wesentlichen Schritt stellt die Entwässerung des Zementsteins dar. Bis ca. 150°C wird das physikalisch gebundene Wasser entfernt. Bei ca. 250°C verdampfen große Mengen an Hydratwasser der Calciumaluminathydrate. Das ist jene Phase, bei der es zu den häufigsten explosionsartigen Zerstörungen kommt. Zu rasches Vorgehen verursacht eine „nachhinkende Temperatur“ in der Wand und ein Temperaturgefälle bei etwa 150°C bis 200°C. Bei 500°C bis 600°C ist der Entwässerungsprozess vollständig abgeschlossen. Bei Temperaturen über 900°C bis 1000°C kommt es zu Mineralneubildungen im Gefüge, wobei diese Phase stark variieren kann und je nach Ausgangsstoffen (z.B. Quarz, Cristobalit, Mullit, Korund) langsam oder sprunghaft stattfindet (58 S. 24) (47 S. 173).

3.5 Eigenschaften von Feuerbetonen

In diesem Abschnitt werden die für diese Arbeit ausschlaggebenden Eigenschaften näher erläutert. In der Feuerfestindustrie kommen jedoch bei der Entwicklung und beim Einsatz noch eine Reihe weiterer wesentlicher Eigenschaften hinzu, wie z.B. Wärmeleitfähigkeit, Kontaktreaktionen zwischen den einzelnen Stoffen, Sublimation uvm.

3.5.1 Mechanische Eigenschaften

3.5.1.1 Kaltfestigkeit

Die Kaltdruckfestigkeit (abgekürzt: KDF) und die Kaltbiegefestigkeit (abgekürzt: KBF) zählen zu den wesentlichen Kenngrößen bei feuerfesten Erzeugnissen. Sie stellen jene Festigkeiten des Probekörpers dar, die nach dem Aufheizen bis zu einer bestimmten Temperatur, vom wieder abgekühlten Probekörper bei entsprechender Belastung erreicht werden. Je nach Form und Größe des Probekörpers können die Werte stark voneinander abweichen. Übliche Schamottefeuerbetone (Typ RC – regular castables) weisen charakteristische Kaltdruckfestigkeitskurven wie in Bild 3.9 auf, wobei schon hier zu erkennen ist, dass diese mit den Festigkeitskurven normaler bzw. ultrahochfester Betone kaum vergleichbar sind und die W/Z-Werte der Feuerbetone (in der Abbildung: „W/C“) im Vergleich zum UHPC höher sind. Feuerbetone weisen bei 20°C sehr hohe Kaltdruckfestigkeiten auf (zwischen 60 N/mm² und 80 N/mm², können allerdings auch Festigkeiten von 120 N/mm² erreichen) (47 S. 290).

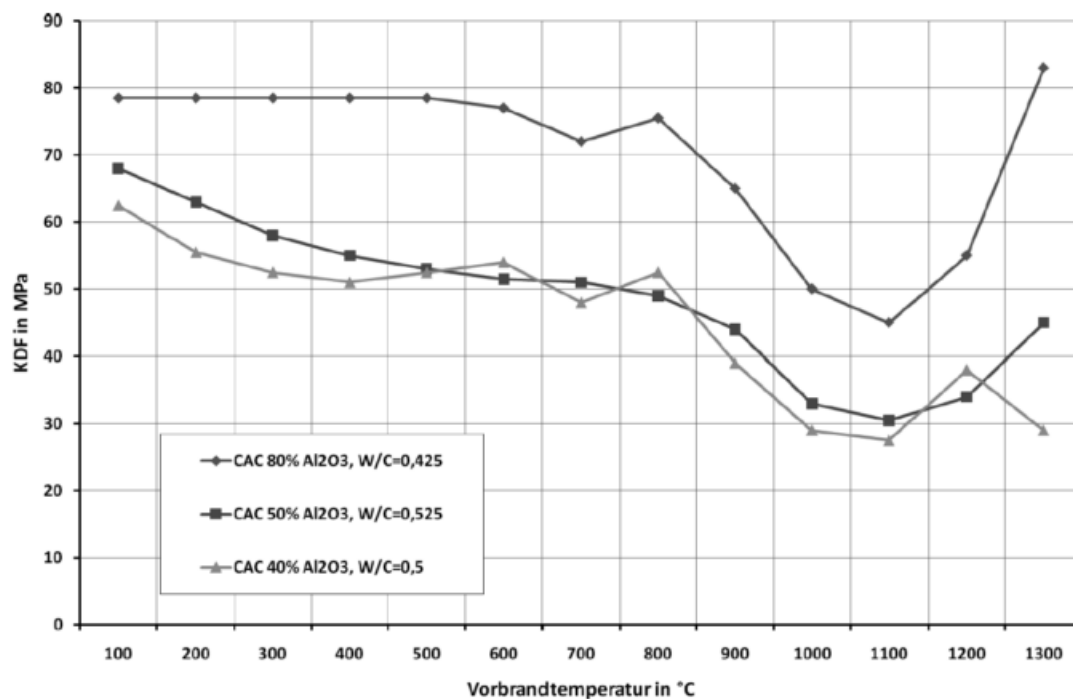


Bild 3.9: Kaltdruckfestigkeit eines Schamottebetons mit 20% Zementanteil bestehend aus drei unterschiedlichen Calciumaluminatzementen (40, 50 sowie 80% Al₂O₃-Anteil) (47 S. 157)

Im Allgemeinen ist die Höhe der Festigkeiten beim Feuerbeton abhängig von:

- der Art des Feuerbetons
- der Art und den Bestandteilen des Zuschlagstoffes

- der Korngröße und Kornform
- der Zementart
- dem Wasser/Zement-Wert
- der Verarbeitung und Nachbehandlung (47 S. 157 ff.).

Bis 800°C verliert der Zementstein langsam an Festigkeit. Ab 800°C tritt das Phänomen eines „Festigkeitsloches“ auf. Dieser starke Abfall der Festigkeit entsteht aufgrund des Entwässerungsprozess der Calziumaluminathydrate und einer Veränderung der Porenstruktur (Porenaufweitung). Bei einer Temperatur von ca. 1100°C kommt es zu einem Anstieg der Festigkeit, der auf die Neubildung von Mineralien (keramische Bindung) aus den Tonerdezementkomponenten und den Zuschlagsstoffen zurückzuführen ist.

In Bild 3.10 wird zum Vergleich die Kaltbiegezugfestigkeit dargestellt. Es zeigt ein sehr ähnliches Bild.

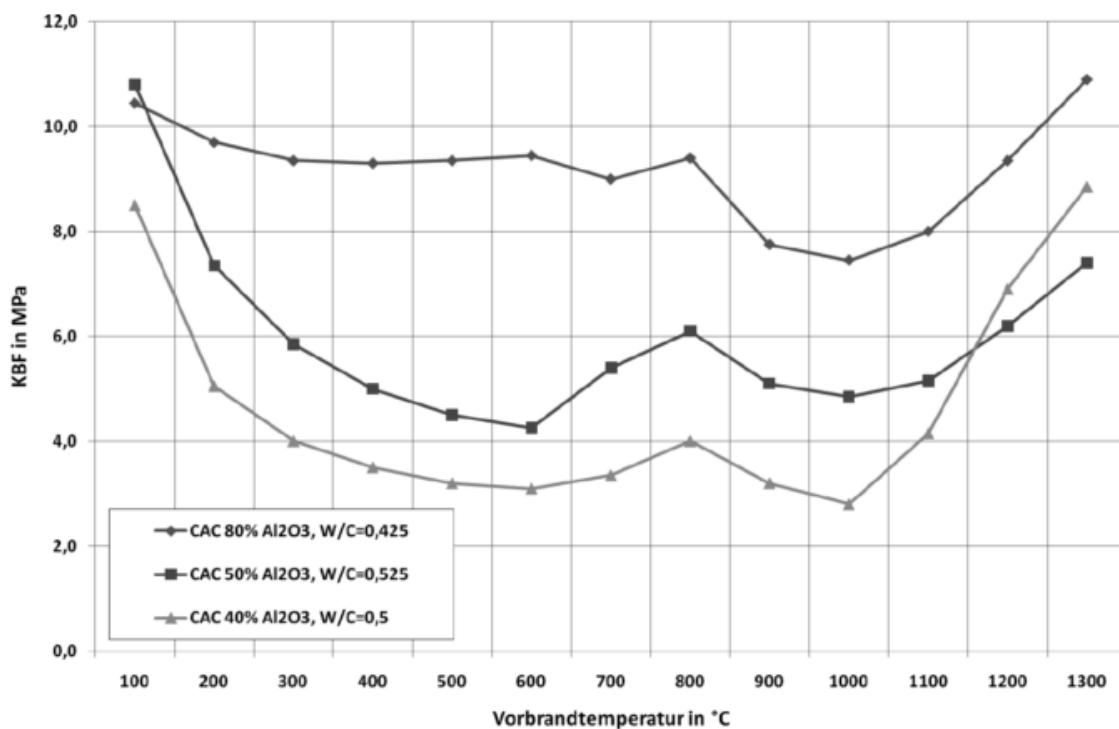


Bild 3.10: Kaltbiegefestigkeit eines Schamottebetons mit 20% Zementanteil bestehend aus drei unterschiedlichen Calciumaluminatzementen (40, 50 sowie 80% Al₂O₃-Anteil) (47 S. 158)

Bild 3.11 zeigt die Kaltdruckfestigkeiten unterschiedlicher Zementtypen mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen. Man erkennt, dass ein geringerer Zementanteil zu einem höheren Festigkeitsniveau führt und die Festigkeit selbst weniger stark abfällt als bei Betonen mit höherem Zementanteil.

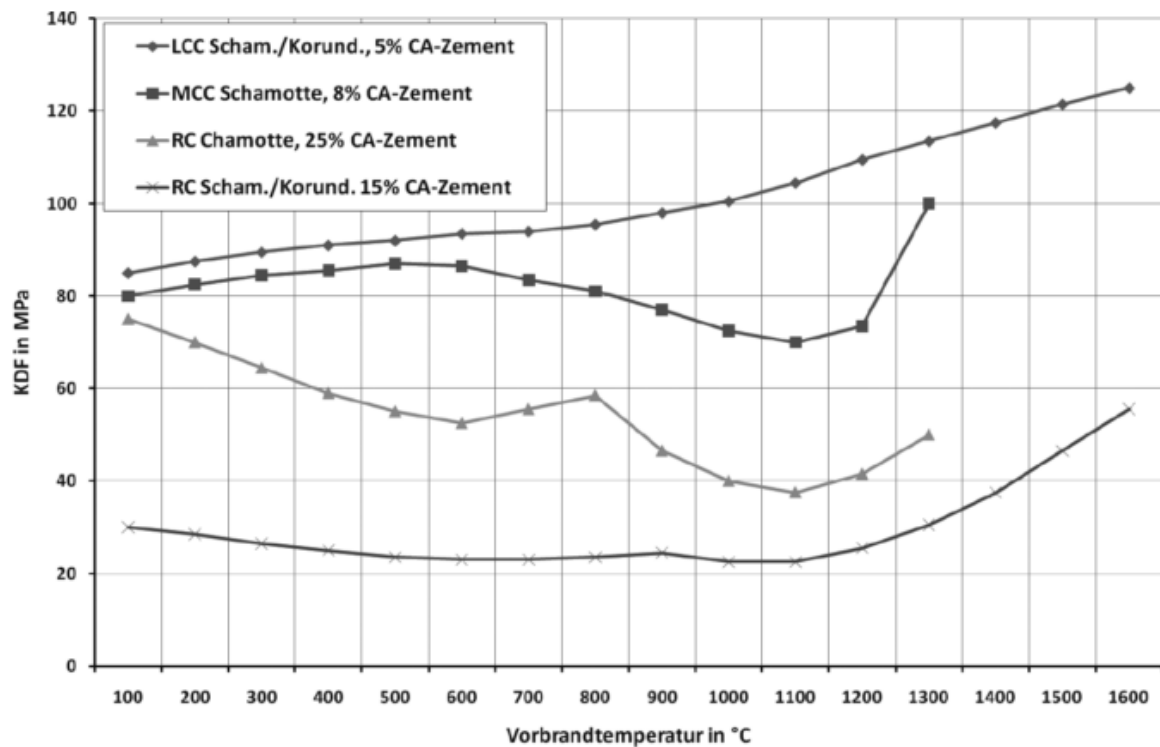
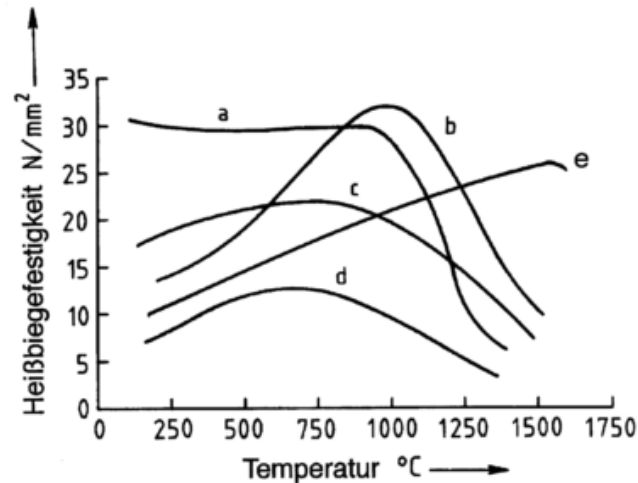


Bild 3.11: Kaltdruckfestigkeit bei unterschiedlichen Zuschlagsstoffen und Zementtypen (47 S. 160)

3.5.1.2 Heißfestigkeit

„Unter Heißfestigkeit versteht man die Widerstandsfähigkeit eines festen Körpers bei einer konstanten Temperatur“ (60). Der Höhe der Festigkeit entspricht jenem Wert, der zum Zeitpunkt der Zerstörung durch die Druck-, Zug-, oder Torsionsbelastung erreicht wurde. Im Vergleich zur Kaltdruckfestigkeit, die Auskunft über „die Ausbildung und Gleichmäßigkeit des Werkstoffgefüges“ (z.B. Porosität) gibt, schließen Heißfestigkeiten auf wichtige Eigenschaften des thermodynamischen Verhaltens der Feuerbetone (47 S. 289). In Bild 3.12 ist ein Vergleich der Heißbiegefestigkeiten unterschiedlicher ungeformter feuerfester Erzeugnisse abgebildet.



a) LCC-F Feuerbeton mit Feinst-SiO₂-Zusatz; b) ULCC-F Feuerbeton; c) Korundstein (zum Vergleich); d) Stampfmasse; e) LCC-F Feuerbeton ohne Feinst-SiO₂-Zusatz

Bild 3.12: Beispiel der Heißbiegefestigkeit von feuerfesten Korundwerkstoffen (47 S. 289)

Die Festigkeitsmaxima entstehen in jenen Temperaturbereichen, in denen es zum Auftreten der Schmelzphasen kommt. Weiters können aufgrund des sehr unterschiedlichen Dehnungsverhaltens der einzelnen Werkstoffe Spannungen im Gefüge entstehen, wodurch Festigkeitsmaxima hervorgerufen werden (47 S. 288 ff.).

3.5.1.3 Abriebbeständigkeit

In der Feuerfestindustrie ist für einige Einsatzbereiche wie die Petrochemie, Müllverbrennungsanlagen oder Kohlekraftwerke die Abriebfestigkeit von Bedeutung. Im Allgemeinen können für die experimentelle Überprüfung zwei genormte Verfahren herangezogen werden: „das Stahlabriebverfahren nach DIN EN ISO 16282“ und „das Schleifabriebverfahren nach DIN 52108“ (47 S. 256). Zur groben Abschätzung wird oftmals die Kaltdruckfestigkeit herangezogen. Bei Druckfestigkeiten von unter 60 bis 100 N/mm² ist ein hoher Abrieb zu erwarten. Diese Annahme ist allerdings nicht allzu verlässlich, da beim Abrieb Faktoren wie die Gefügestruktur, die Abbindephasen des Feuerbetons und Kornform und -größe eine entscheidende Rolle spielen. Bei hohen Temperaturen steigt zumeist die Abriebbeständigkeit (47 S. 265 ff.).

3.5.1.4 Druckerweichen und Druckfließen

Aufgrund der Zusammensetzung aus mehreren Komponenten weisen feuerfeste Erzeugnisse ein inhomogenes Gefüge auf. Da diese Werkstoffe aus diesem Grund keinen fixen Schmelzpunkt aufweisen, wird das Erweichungsverhalten untersucht und charakterisiert (53 S. 722 ff.).

Zwei Begriffe, die hierbei in der Feuerfestindustrie von Bedeutung sind, sind das Druckerweichen und das Druckfließen.

„Druckerweichen beurteilt das Erweichungsverhalten feuerfester Werkstoffe bei steigender Temperatur unter konstanter Belastung“ (47 S. 270). Das Druckerweichen wird in der DIN EN ISO 1893:2008-09 geregelt (61). Mit Hilfe eines Differentialverfahrens kann die Verformung des Werkstoffes während einer konstanten Druckbelastung bei gleichmäßig steigender Temperatur bestimmt werden. Die Norm definiert eine Höchsttemperatur von 1700°C.

Im Gegensatz zum Druckerweichen, beschreibt das Druckfließen (DIN EN 993-9) „die zeitliche Verformung bei konstantem Druck und konstanter Temperatur über einem längeren Zeitraum, üblicherweise über 25 Stunden“ (47 S. 270 ff.) (53 S. 722 ff.).

3.5.1.5 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul wurde in Kapitel 2.5.6 eingehend erläutert. Spannungs- und Verformungskurven können im Feuerfestbereich je nach Temperaturbereich stark voneinander abweichen. Das Bild 3.13 stellt den vergleichsweise kleinen Bereich elastischer Verformungen eines feuerfesten Werkstoffes dar.

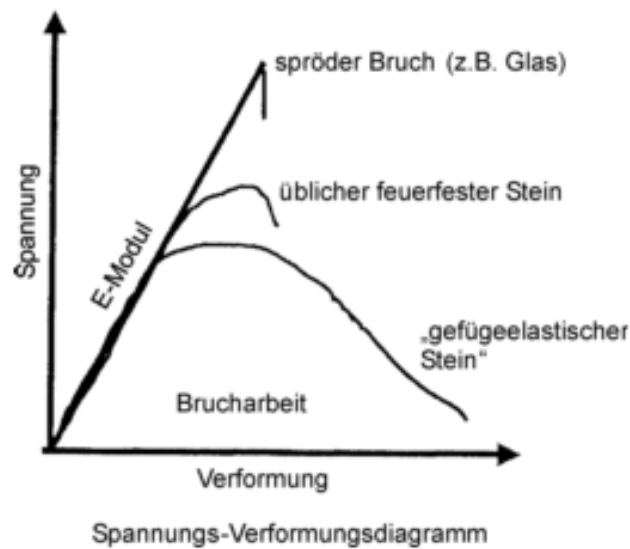


Bild 3.13: Schematische Darstellung von Spannungs-Verformungsdiagrammen (47)

Da feuerfeste Werkstoffe bis zum Auftreten einer Schmelzphase ein elastisches Verformungsverhalten aufweisen, sind die temperaturabhängigen Darstellungen in der Feuerfesttechnologie von höherer Bedeutung. Sie stellen das elastische Verformungsverhalten bis zum Auftreten einer Schmelzphase dar (siehe Bild 3.14) (47 S. 276).

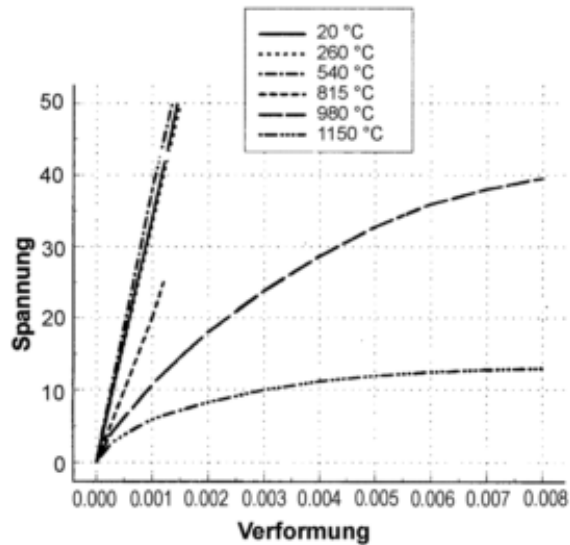


Bild 3.14: Druckspannungsverformungskurven eines Schamottesteines in Abhängigkeit von der Temperatur (47)

3.5.2 Temperaturwechselbeständigkeit

In der Feuerfestindustrie gehört die Empfindlichkeit aufgrund des Temperaturwechsels zu einer der Hauptursachen von Schäden und Zerstörungen beim Einsatz des Werkstoffes. Temperaturwechselbeständigkeit stellt die Widerstandsfähigkeit eines Stoffes gegen „schröffen“ Temperaturwechsel dar (55 S. 237 ff.). Durch die Inhomogenität der Temperaturverteilung im Werkstoff werden temporäre thermische Spannungen ausgelöst, die zu elastischen Verformungen führen. Bei der Überschreitung der Materialfestigkeit kann es zum Materialversagen bis zum Bruch kommen. Häufig sind Zugspannungen dafür verantwortlich. Bei sehr „schnellen, schockartigen Veränderungen der Temperatur“ spricht man vom sogenannten Thermoschock (62).

Um die Temperaturwechselbeständigkeit feuerfester Baustoffe zu prüfen, werden folgende genormte Prüfverfahren eingesetzt:

- Die Wasserabschreckmethode nach DIN 51068: Der Probekörper in Form eines Zylinders wird nach einer Erhitzung auf 950°C in Wasser abgeschreckt (für dichte feuerfeste Erzeugnisse, wie Feuerbetone).
- Die Luftabschreckmethode nach DIN EN 993-11: Der Probekörper in Form eines Quaders wird auf 950°C erwärmt und dann mit Pressluft angeblasen (für Wärmedämmprodukte) (47 S. 314 ff.).

Das Abschrecken wird so lange wiederholt bis das Gefüge des Probekörpers zerstört ist.

Generell werden die Probekörper visuell nach Art und Stärke untersucht, der Abfall der Festigkeit und der E-Modul werden durch Messung ermittelt (47 S. 314 ff.).

3.5.3 Gasdurchlässigkeit

„Gasdurchlässigkeit ist die Eigenschaft poröser Werkstoffe, bei Druckunterschied Gase durchströmen zu lassen“ (47 S. 282). Bei feuerfesten Werkstoffen wird die Gasdurchlässigkeit hauptsächlich vom Porenanteil mit über 10 µm-Durchmessern gemessen. Das führt dazu, dass Steine mit sehr feinen Durchmessern als gasundurchlässig angesehen werden können. Die Gasdurchlässigkeit wird im Wesentlichen über den Porenaufbau vom Kornaufbau, Pressdruck und Brennverhalten beeinflusst. Veränderungen des Gefüges können auch erst später während der Verwendung auftreten (47 S. 282 ff.).

Im Allgemeinen ist die Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Erzeugnissen sehr niedrig (siehe Tabelle 3.8).

Tabelle 3.8: Gasdurchlässigkeitswerte für feuerfeste Werkstoffe (47 S. 284)

Werkstoff	Gasdurchlässigkeit µm ² (= 10 nPm)
Silikasteine	0,1–1,2
dichte saure Schamottesteine	0–0,2
Schamottesteine	0,05–2,0
aluminareiche Steine	0,02–1,5
Zirkonsilikatstein	0,2
Kohlenstoffsteine*	< 0,15
Graphitsteine*	< 0,05
SiC-Steine	0,01–0,55
Magnesiasteine	0,1–2,0
Magnesiachromsteine	0,8–2,0
Dolomitsteine	0,2–2,0
getemperte graphithaltige Erzeugnisse*	< 0,005
dichte isostatisch gepreßte Steine	0
schmelzgegossene Steine	0
Forsteritsteine	< 1,5
Feuerbetone (bei 110° getrocknet)*	< 0.005
Feuerleichtbetone (bei 110°C getrocknet)*	< 0,2
Feuerleichtsteine	1–20(100)
feinporige Feuerleichtsteine	0,1–0,3
Spülstein	10–25

* bei Oxidation wird bzw. beim Brand kann sich die Gasdurchlässigkeit merklich erhöhen.

Bei dem Temperaturanstieg nimmt die Gasdurchlässigkeit noch weiter stark ab, wobei bereits bei 500°C mit einem 50%igen Abfall zu rechnen ist (47 S. 283).

3.5.4 Granulometrische Eigenschaften von Feuerbetonen

3.5.4.1 Porosität

Wie bereits erwähnt stellt die Porosität jenen Anteil des Volumens dar, der den Hohlraum ergibt. Die Porosität (Bild 3.15) beeinflusst bei keramischen Werkstoffe aus der Feuerfestindustrie eine Vielzahl an Eigenschaften, neben der Festigkeit unter anderem auch die chemische Beständigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit (53 S. 731 ff.) (47 S. 307).

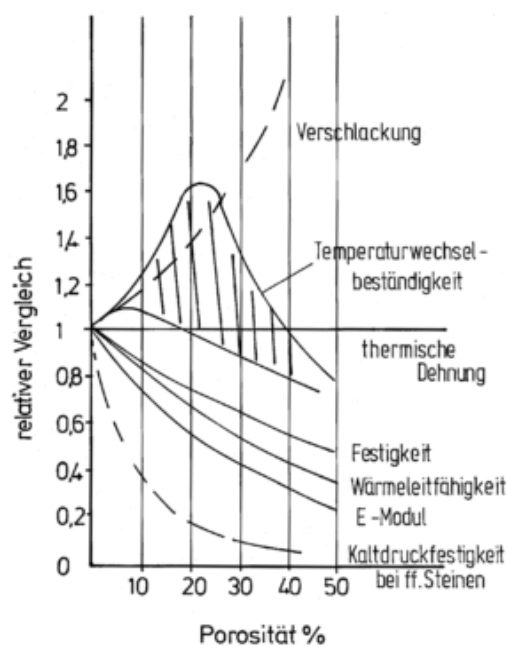


Bild 3.15: Einfluss der Gesamtporosität auf die Eigenschaften feuerfester Werkstoffe (47 S. 307)

Der Begriff der Porosität ist in Kapitel 2.7.2 näher erläutert worden. Porosität kann in unterschiedlichen Arten (geschlossen oder offen) auftreten. In Bild 3.16 sind Art und Bestimmungsmethoden übersichtlich dargestellt.

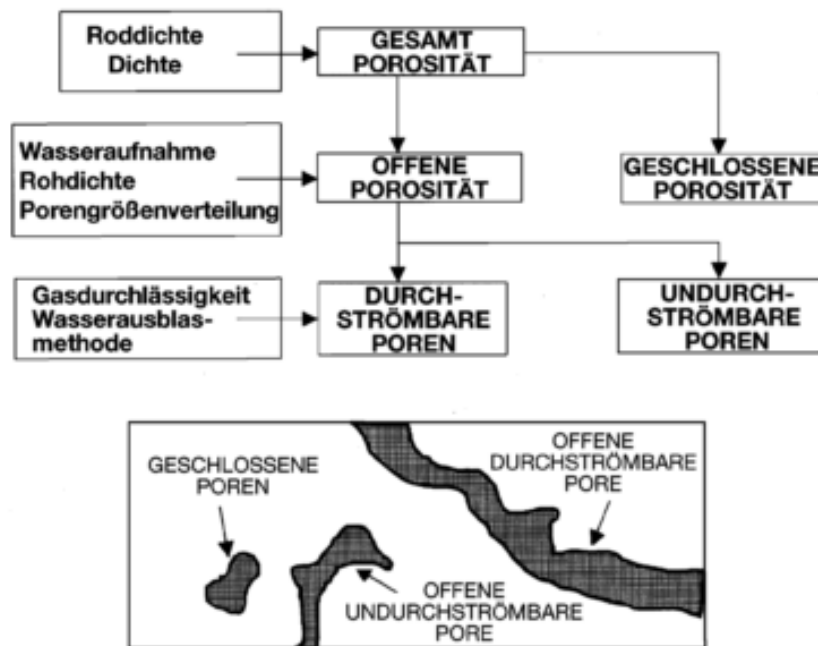


Bild 3.16: Die verschiedenen Arten der Porositäten und ihre Bestimmungsmethoden (47 S. 307)

Bei gebrannten Baustoffen wird das spezifische Gewicht (true specific gravity = Rohdichte) vom Raumgewicht (apparent specific gravity) unterschieden. Die „apparent specific gravity“ (die scheinbare Porosität) beschreibt das Gewicht des Volumens mit den geschlossenen Poren und ohne Einbezug der offenen Poren (liegt also zwischen der Reindichte und der Rohdichte) (47 S. 306 ff.). Bei der Anwendung der Verfahren ist zu beachten, dass bei der Ermittlung der offenen Porosität ausschließliche jene Poren, die von außen erreichbar sind, erfasst werden. Die Differenz zwischen der Gesamt- und der offenen Porosität kann hierbei 2 Vol.-% betragen (53 S. 731 ff.).

Die Porengrößenverteilung bzw. im Besonderen die „Form und Verteilung der im Werkstoff vorliegenden Poren“ haben ebenfalls einen großen Einfluss auf wesentliche Eigenschaften von Feuerfeststoffen. Grob gesprochen, führt eine Verkleinerung der Poren zu einer Optimierung der Werkstoffeigenschaften (47 S. 306 ff.). In Bild 3.17 sind die Porengrößenverteilungen unterschiedlicher Feuerfestbetone dargestellt.

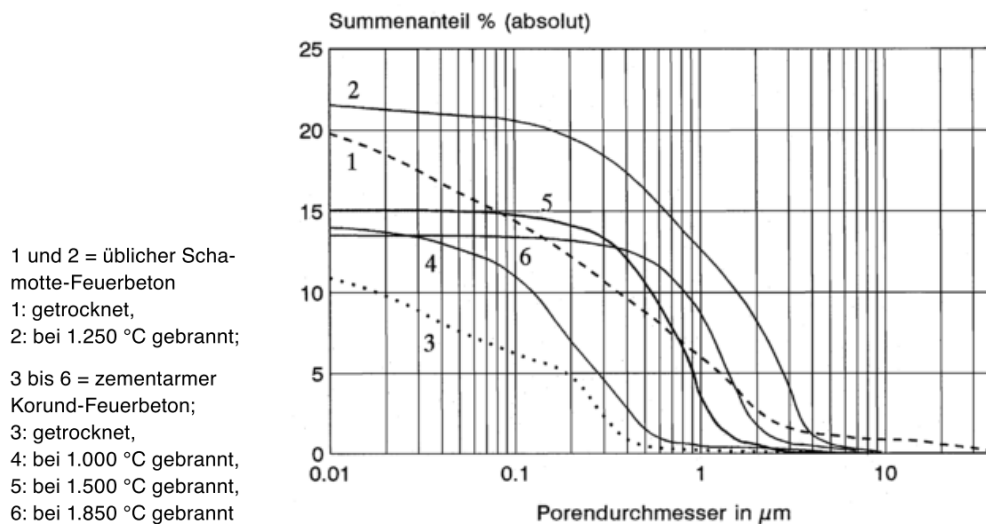


Bild 3.17: Porengrößenverteilung in dichten Feuerbetonen (47 S. 305)

In der Theorie wird bei den Berechnungen von runden Kapillaren ausgegangen, einem Ideal, das die sehr unregelmäßigen und „ungeformten“ (z.B. kantigen) Porenräume nicht erreichen können. Aus diesem Grund wird bei der Bestimmung der Porengrößenverteilung vom „äquivalenten Porendurchmesser“ gesprochen (47 S. 304). In Feuerfestbetonen ist ein großer Prozentsatz der Porendurchmesser unter 1 µm.

3.5.4.2 Packungsdichte

Wie bereits in Kapitel 2.7 diskutiert, wird die Porosität von der Korngrößenverteilung und Packungsdichte stark beeinflusst. Neben der vorhandenen Porosität der Ausgangsstoffe bei feuerfesten Werkstoffen kommen vor allem die Einflussfaktoren durch den Brand sowie die chemischen Reaktionen der Stoffe hinzu.

Sowohl in der Feuerfestindustrie als auch in der Betontechnologie greift man auf die gleichen theoretischen Modelle zur Optimierung der Packungsdichte zurück. In beiden Fällen wird von kugelförmigen Ausgangskörnungen ausgegangen. Die Problematik hierbei ist, dass besonders bei feuerfesten Werkstoffen bereits bei den Ausgangsstoffen mit sehr unregelmäßigen Körnungen und Texturen gerechnet werden muss.

4 Versuchsvorbereitung und Vorversuche

4.1 Einleitung

In vorliegendem Abschnitt werden der Ablauf, die Durchführung und die Auswertung der Voruntersuchungen eingehend beschrieben.

4.2 Aufbau und Ablauf

4.2.1 Überblick

Um eine Weiterentwicklung des Feuerbetons zu ermöglichen, wurde dem Institut für Baustofflehre die betreffende Rezeptur (in der Feuerfestindustrie: ein sogenannter Versatz) mit den dazu benötigten Ausgangsstoffen geliefert. Im ersten Schritt wurden diese Rohstoffe jeweils den im nächsten Abschnitt 4.2.2 angeführten Verfahren zur Ermittlung der Kornverteilungen und Porosität unterworfen.

4.2.2 Voruntersuchungen

Die Untersuchungen wurden am Institut für Baustofflehre in Zusammenarbeit mit *Christian Lebeda* und *Karin Fussenegger* durchgeführt.

Die in 4.2.3 beschriebenen Rohstoffe wurden zwecks genauerer Analyse folgenden Vorversuchen unterworfen:

- Heliumpyknometer
- Kapillarpyknometer
- Quecksilberporosimeter
- Sedimentationsanalysen
- Trockensiebung
- Thermische Analyse (Gewichtsänderung und Wärmetönungen)
- Ultraschalldispargierung.

Da die thermische Analyse für diese Arbeit keinen wesentlichen Beitrag leistet, wurde auf eine nähere Beschreibung und Auflistung der Resultate verzichtet.

4.2.3 Charakterisierung der Rohstoffe und des Referenzbetons

Der für diese Arbeit zur Verfügung gestellte Referenzbeton auf Basis von Hochwert-Schamotte mit einer Tonerdezementbindung besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten (Tabelle 4.1):

Tabelle 4.1: Versatz des Referenzbetons

Rohstoffbezeichnung	Anteile [M.%]	Bemerkung
Clayrac A45 0-0,5 mm	26,99	Hochwert – Schamotte
Clayrac A45 1-3 mm	24,99	Hochwert – Schamotte
Clayrac A45 3-5 mm	19,99	Hochwert – Schamotte
Edelkorund "ALODUR" 0 - 0,1 mm	10,00	Edelkorund
Silubit FB 10	6,00	Fließ – Mittel
Trinatriumzitrat	0,04	Verzögerer
TSZ SECAR 71	12,00	Tonerdezement (71% Al ₂ O ₃)
Summe	100,01	

Die Charakterisierung der Rohstoffe wurde mit Hilfe von

- übermittelten Datenblättern/Produktbeschreibungen und Sicherheitsdatenblättern
- Literaturrecherchen und
- eigenen Untersuchungen des Instituts (wie Korngrößenanalysen uvm.) durchgeführt.

Im folgenden Teil der Arbeit werden die einzelnen Rohstoffe nach ihren Charakteristika und Eigenschaften beschrieben und analysiert.

4.2.3.1 Clayrac

Produktname:

Clayrac

Hersteller:

Firma AGS Mineraux, F-172070 Clerac

Kurzbeschreibung:

Bei dem Produkt Clayrac handelt es sich um in Drehrohröfen gebrannte Schamotte aus kaolinitischen Tonen. Bei der oben genannten Rezeptur kommt die Schamotteart Clayrac 45 N in unterschiedlichen Kornfraktionen zum Einsatz (63).

Physikalische Kenngrößen:

Die Schamotte ist ein graubräunliches Pulver mit Partikel unterschiedlicher Korngrößen. In folgender Tabelle 4.2 finden sich die wesentlichen physikalischen Kenngrößen.

Tabelle 4.2: Physikalische Angaben des Clayrac 45 N

Größe	Wert
Schüttdichte [g/cm ³]*	2,52
Reindichte [g/cm ³]**	2,67
Scheinbare Porosität [%]*	4,0
Gesamtporosität [%]***	6,7 – 8,7
Wasseraufnahme [%]*	1,6

*) Herstellerangabe

**) Bestimmung mittels Heliumpyknometer und Kapillarpknometer

***) Bestimmung mittels Quecksilberporosimeter

Die Untersuchungen der Porosität wurden am Institut für Baustofflehre und Brandschutz mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie durchgeführt. Es wurden Proben mit einem Korndurchmesser von mehr als 8 mm und Proben mit Korndurchmesser zwischen 4 und 8 mm untersucht. Wie Bild 4.1 zeigt, weist die Gruppe mit dem größeren Durchmesser (> 8 mm) eine höhere Porosität (ungefähr 8,7%) auf, während die Gruppe der kleineren Durchmesser (4-8 mm) eine geringer Gesamtporosität (ungefähr 6,7%) zeigt.

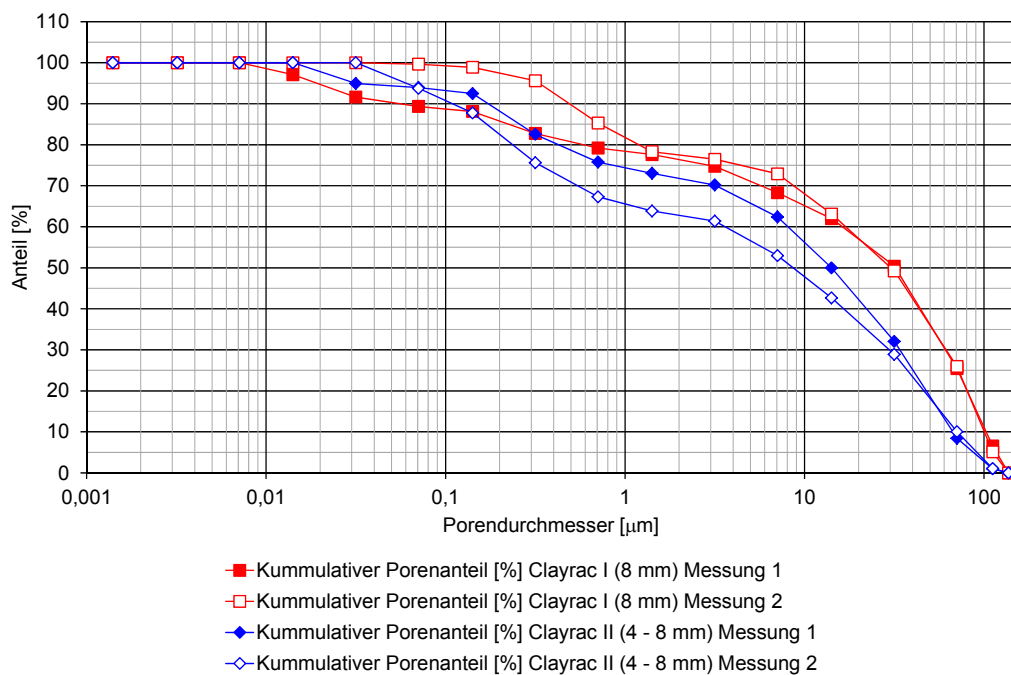


Bild 4.1: Ergebnis der Porenverteilung Clayrac 45 N bestimmt mittels Quecksilberporosimetrie

Chemische Zusammensetzung:

Die Bestandteile der Schamotte sind vorwiegend Mullit und Cristobalit. In der Tabelle 4.3 werden die chemischen Kenngrößen laut Produktdatenblatt dargestellt.

Tabelle 4.3: Chemische Zusammensetzung von Clayrac 45 N lt. Datenblatt (64)

Oxid	Anteil [%]
Al ₂ O ₃	45,0
SiO ₂	50,9
Fe ₂ O ₃	1,4
TiO ₂	1,6
K ₂ O	0,4
Na ₂ O	0,1
CaO	0,3
MgO	0,3

Korngrößenverteilungen:

Die Firma AGS Mineraux vertreibt das Produkt Clayrac in unterschiedlichen Kornzusammensetzungen. Die Korngrößen des vorliegenden Versatzes befinden sich in folgender Größenordnung:

- Clayrac A45 0 - 0,5 mm,
- Clayrac A45 1 - 3 mm und
- Clayrac A45 3 - 5 mm.

Die drei Korngruppen wurden zur exakteren Untersuchung einer Korngrößenanalyse unterzogen. Die Verteilungsanalyse wurde durch Trockensiebung und für Anteile < 63 µm durch Sedimentationsanalysen ermittelt. Im Bild 4.2 sind die Kornverteilungen der eingesetzten Schamottekörnungen dargestellt.

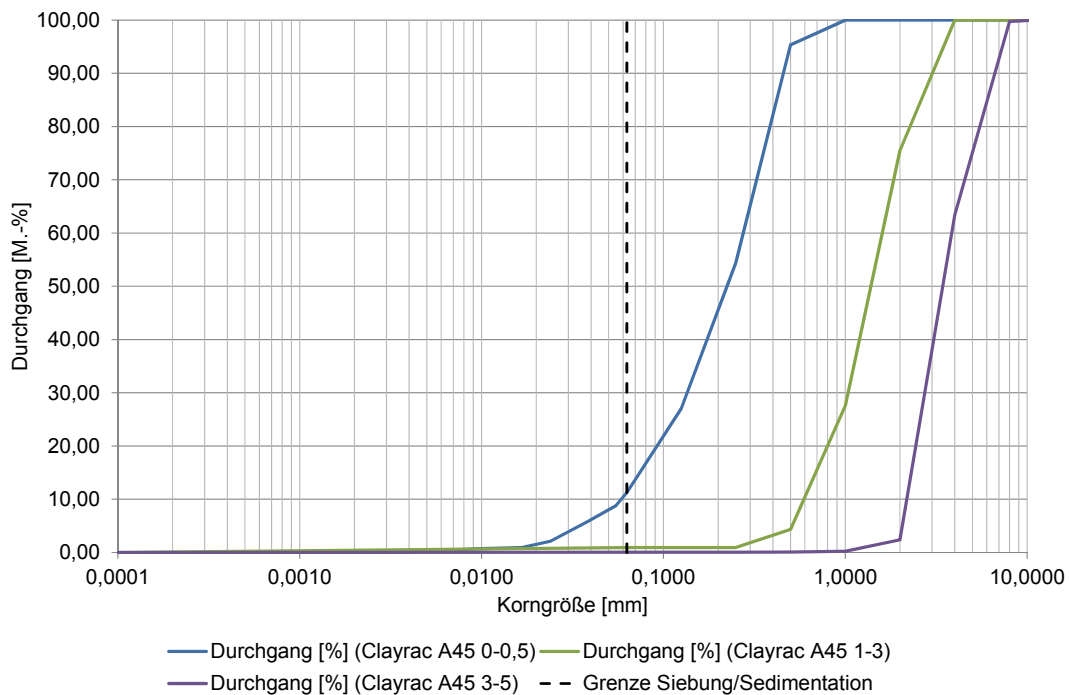


Bild 4.2: Kornverteilungen der eingesetzten Schamottekörnungen bestimmt mittels Trockensiebung und Sedimentationsanalysen

4.2.3.2 Edelkorund ALODUR®

Produktname:

Alodur® (65)

Hersteller:

Treibacher Schleifmittel GmbH (65)

Kurzbeschreibung:

Der Edelkorund Alodur® ist ein graues, geruchloses Pulver. Es wird als geschmolzenes, zerkleinertes Aluminiumoxid in der Schleifmittel- und Feuerfesttechnik eingesetzt.

Physikalische Kenngrößen:

In Tabelle 4.4 sind die wesentlichen physikalischen Kenngrößen des verwendeten Edelkorunds aufgelistet.

Tabelle 4.4: Physikalische Daten des Edelkorund „ALODUR“ WRG

Größe	Wert
Schüttdichte [kg/m ³] laut Herstellerangaben	200 – 2500
Reindichte [g/cm ³] laut Herstellerangaben	3,7 – 4,5
Reindichte [g/cm ³] durch Bestimmung mittels Heliumpyknometer (am Institut für Baustofflehre)	3,99

Chemische Zusammensetzung:

Wie aus der Tabelle 4.5 ersichtlich besteht der Edelkorund Alodur beinahe vollständig (zu 99,46%) aus reiner Tonerde (Al_2O_3).

Tabelle 4.5: Typische chemische Analyse von ALODUR WRG (Fraktion 0 - 0,2 mm) lt. Herstellerdatenblatt (63)

Oxid	Anteil [%]
Al_2O_3	99,46
Fe_2O_3 (Gesamteisen)	0,09
Na_2O	0,45

Korngrößenverteilungen:

Bei der vorliegenden Probe konnte anhand der Sedimentationsanalyse der Korngrößenbereich von 0 – 0,2 mm ermittelt werden (siehe Bild 4.3).

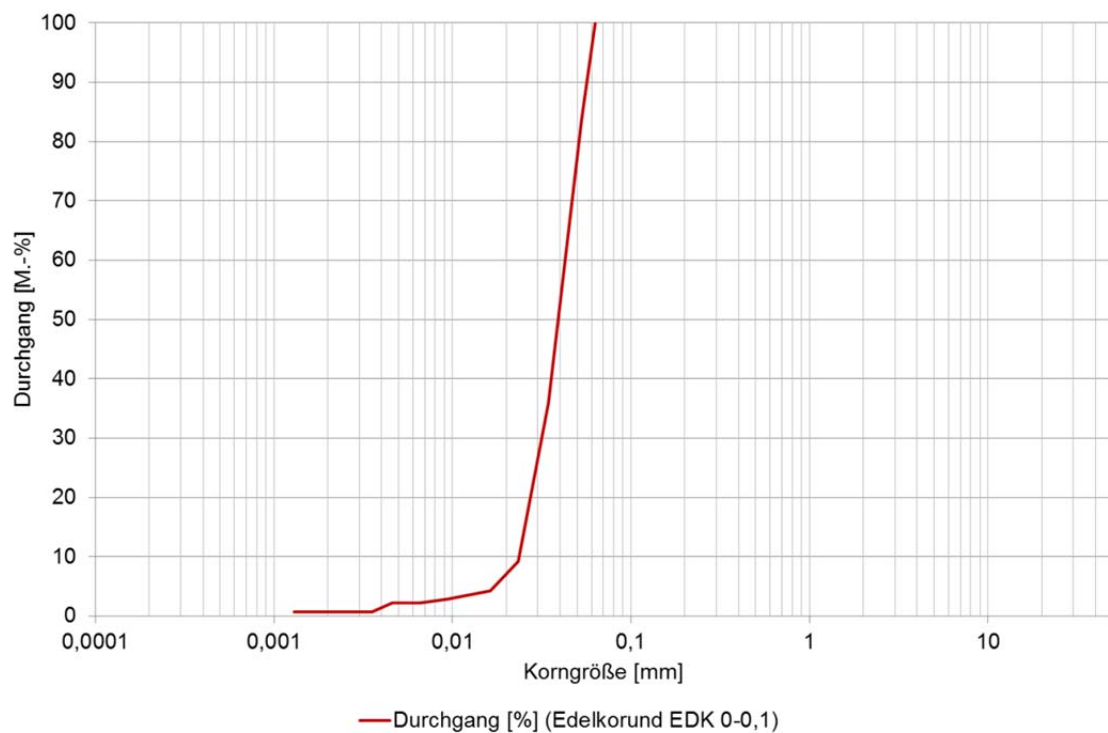


Bild 4.3: Kornverteilung von „ALODUR“ 0 - 0,1 mm bestimmt mittels Sedimentationsanalysen

4.2.3.3 Silubit FB 10

Produktname:

Silubit FB 10

Hersteller:

Fa. ZSCHIMMER & SCHWARZ GmbH & Co. KG

Kurzbeschreibung:

Silubit FB 10 ist ein graues geruchloses Pulver und wird als chemisches Bindemittel mit thixotropierender Wirkung für feuerfeste Massen vertrieben. Laut Herstellerdatenblatt wird Silubit dem Feuerbeton zum Erreichen einer guten Thixotropie in der Größenordnung von 3 bis 5%, bezogen auf den Gesamtversatz, zugesetzt. Bei zementgebundenen Massen liegt die Zusatzmenge von Silubit FB 10 zwischen 2 und 7% (66). Eine wesentliche Eigenschaft des Silubit FB 10 ist der verminderte Festigkeitsabfall der Zementmischung bei 500°C bis 1000°C (66).

Physikalische Kenngrößen:

Die wesentlichen physikalischen Größen werden in der Tabelle 4.6 aufgelistet.

Tabelle 4.6: Physikalische Daten von Silubit FB 10

Größe	Wert
Schüttdichte [g/cm ³]*	0,250
Reindichte [g/cm ³]**	2,66
Schmelzpunkt [°C]*	> 1000
Löslichkeit in Wasser*	ca. 5 g/l bei 20°C

*) Herstellerangabe³

**) Bestimmung mittels Heliumpyknometer

Chemische Zusammensetzung:

Silubit FB 10 ist laut Datenblatt des Herstellers eine „Silikatzubereitung“. In Tabelle 4.7 wird die chemische Zusammensetzung gemäß Datenblatt aufgelistet.

Tabelle 4.7: Chemischen Kennwerte von Silubit FB 10 lt. Datenblatt⁴

Oxid	Anteil [%]
SiO ₂	ca. 80
Al ₂ O ₃	ca. 14
Na ₂ O	ca. 1,5

Im Sicherheitsdatenblatt wird bei Zementen mit geringem Al₂O₃-Anteil auf die Gefahr eines zu raschen Abbindungsprozesses hingewiesen. Ein Tonerdegehalt von mindestens 70% wird für eine leichtere Verarbeitbarkeit empfohlen (66).

Korngrößenverteilungen:

Nach den Untersuchungen und Analysen von *Ch. Lebeda* enthält Silubit FB 10 einen hohen Anteil an sehr feinen Mikrosilika (amorpher Quarz). Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die

³ Vgl. SICHERHEITSDATENBLATT: SILUBIT FB 10, Stand: 1.3 09/2002

⁴ Vgl. Datenblatt SILUBIT FB 10, Stand 21. April 2009

Substanz durch Mischen eher schwer dispergierbar ist. Für die Sedimentationsanalyse wurde die Probe mit Hilfe von Ultraschall dispergiert (63).

Im Bild 4.4 wird das Resultat der Sedimentationsanalyse dargestellt.

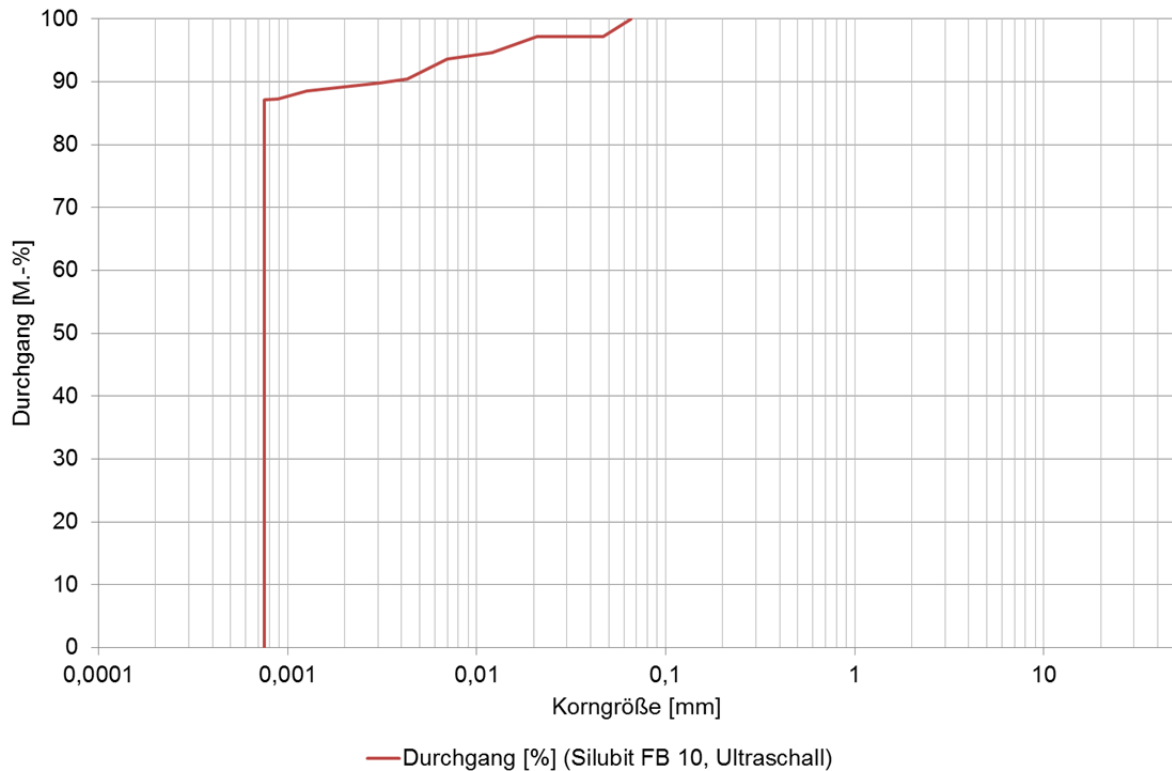


Bild 4.4: Kornverteilung von Silubid FB 10 bestimmt mittels Sedimentationsanalyse und Ultraschalldispersion

4.2.3.4 Trinatriumzitat

Produktname:

Trinatriumzitat oder E 331 (67)

Hersteller:

z.B. Fa. Merck

Kurzbeschreibung:

Trinatriumzitat oder Natriumzitat ist das Natriumsalz der 2-Hydroxypropan-1,2,3-Tricarbonsäure (Zitronensäure) (68) (63).

Physikalische Kenngrößen:

Natriumzitat ist ein geruchloses, farbloses oder weißes, nach Seife schmeckendes Pulver (67) (68) (63). In Tabelle 4.8 werden die physikalischen Kenngrößen angeführt.

Tabelle 4.8: Physikalische Daten von Natriumzitat

Größe	Wert
Schüttdichte [kg/m ³]*	900
Dichte [g/cm ³]*	1,76
Reindichte [g/cm ³]**	1,755
Schmelzpunkt [°C]*	n.a., Zersetzung bei > 230°C
Löslichkeit in Wasser	ca. 425 g/l bei 20°C

*) Angaben lt. GESTIS-Stoffdatenbank (67)

**) Bestimmung mittels Heliumpyknometer

Chemische Zusammensetzung:

Die Summenformel von Trinatriumzitat kann als $C_6H_5Na_3O_7$ angeschrieben werden. Beim Einsatz als Verzögerer für die Herstellung von Feuerbetonen ist der Na_2O -Gehalt (ca. 36 M.-% Na_2O ; bezogen auf die kristallwasserfreie Substanz) von Bedeutung.

Korngrößenverteilungen:

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde außer Betracht gelassen. Da sich das Trinatriumzitat im Anmachwasser komplett auflöst, kann es den Partikel Aufbau der Proben auch nicht beeinflussen.

4.2.3.5 SECAR 71®

Produktname:

Secar 71®

Hersteller:

Kerneos SA

Kurzbeschreibung:

Secar ist ein Tonerdezement, der bei Feuerfestbetonen zum Einsatz kommt (69).

Physikalische Kenngrößen:

Secar 71 liegt als weißes, feines, geruchloses Pulver vor (70). Die physikalischen Eigenschaften von Secar 71 finden sich in folgender Tabelle 4.9:

Tabelle 4.9: Physikalische Daten von SECAR 71

Größe	Wert
Schüttdichte [kg/m ³]*	900
Dichte [g/cm ³]*	2.90 - 3.05
Reindichte [g/cm ³]**	2,81
Schmelzpunkt [°C]*	> 1620°C

*) Angaben nach Sicherheitsdatenblatt (70)

**) Bestimmung mittels Heliumpyknometer

Chemische Zusammensetzung:

Mineralogische Komponenten bei einem Tonerdezement treten als Hauptphasen $\text{CaO} \bullet \text{Al}_2\text{O}_3$ und $\text{CaO} \bullet 2 \text{Al}_2\text{O}_3$ sowie Nebenphasen $12 \text{CaO} \bullet 7 \text{Al}_2\text{O}_3$ und α -Tonerde auf (63).

In Tabelle 4.10 sind die wesentlichen chemischen Bestandteile des SECAR 71 lt. Angaben des Herstellers angeführt.

Tabelle 4.10: Hauptbestandteile von SECAR 71 lt. Herstellerangaben (71) (63)

	Übliche Werte [%]	Grenzwerte [%]
Al_2O_3	68,7 - 70,5	> 68,5
CaO	28,5 - 30,5	< 31,0
SiO_2	0,2 - 0,6	< 0,8
Fe_2O_3	0,1 - 0,3	< 0,4
MgO	< 0,5	-
TiO_2	< 0,4	-
SO_3	< 0,3	-
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	< 0,5	-

Korngrößenverteilungen:

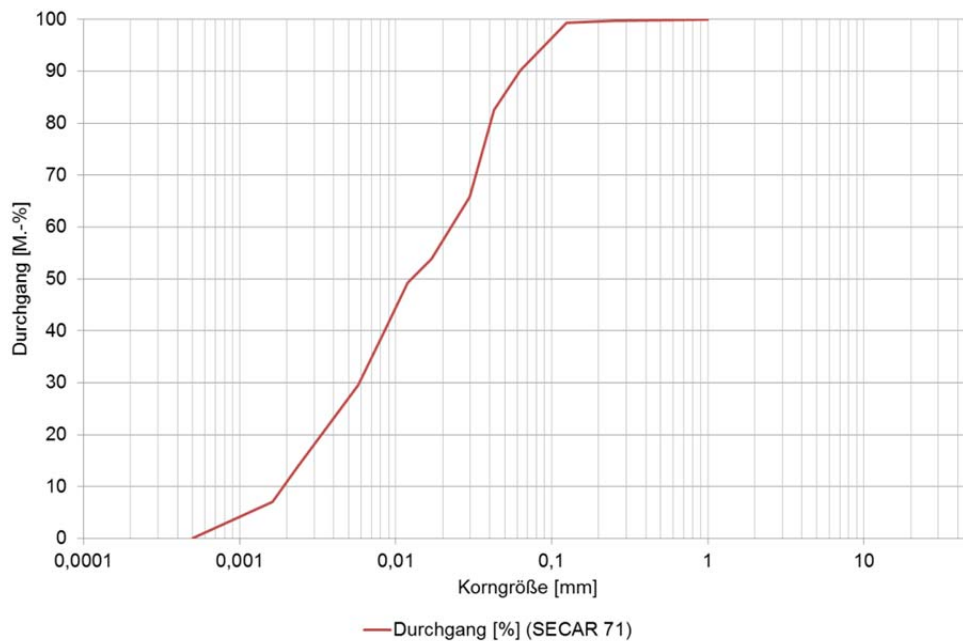


Bild 4.5: Kornverteilungen SECAR 71 (Siebung und Sedimentationsanalysen in Isopropanol)

4.2.4 Kornaufbau der einzelnen Rohstoffe

Mit Hilfe der ermittelten Kornverteilungen der einzelnen Rohstoffe kann eine Schätzung des Kornaufbaus des Feuerbetonversatzes im trockenen Zustand durchgeführt werden. Die Kornverteilung wird von der Schamotte, der Tonerde, dem Silubit und dem Tonerdezement (Secar 71) beeinflusst. Das Trinatriumzitat, in der Funktion eines Verzögerers, wird nicht miteinbezogen, da es in verhältnismäßig geringer Menge eingesetzt wird und sich – wie bereits erwähnt – im Anmachwasser zur Gänze auflöst.

In Bild 4.6 sind die ermittelten Kornverteilungen aller Rohstoffe im Überblick dargestellt. Da die ermittelten Kornverteilungen an optimal vermischten und dispergierten Rohstoffproben vorgenommen wurden, können keine Schlüsse gezogen werden, inwiefern auch ebensolche Kornverteilungen in trockenen bzw. nassen Proben auftreten können. Im Allgemeinen muss angenommen werden, dass es zur Bildung von Agglomeraten besonders im Feinstkornbereich kommt (63).

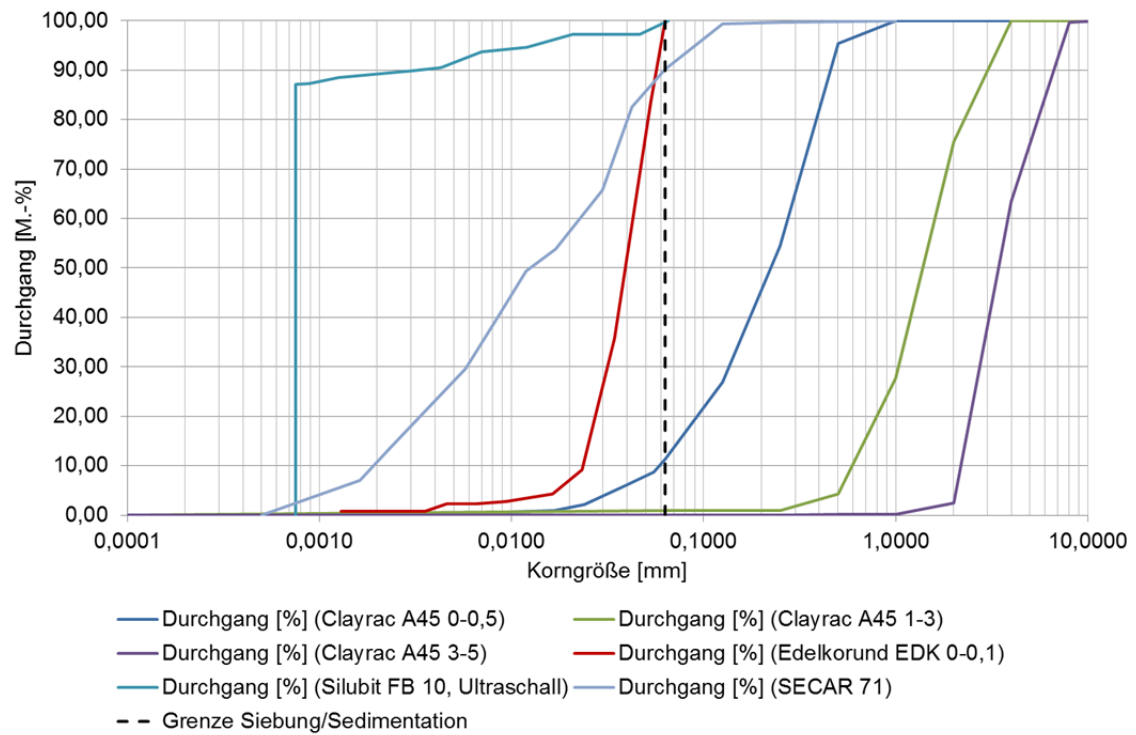


Bild 4.6: Zusammenstellung der Kornverteilungen der einzelnen Rohstoffe

5 Versuchsdurchführung und Auswertung

5.1 Einleitung/Versuchsaufbau

In der vorliegenden Arbeit wurden folgende wesentlichen Untersuchungen vorgenommen:

- 1) Untersuchungen des Referenzbetons
- 2) Prüfen der Porosität und der mechanischen Festigkeiten
- 3) Analyse der Resultate des Feuerbetons im Vergleich mit UHPC
- 4) Erste leichte Abwandlungen der Rezeptur
- 5) Schlüsse und Überlegungen zu weiteren Schritten

5.2 Anforderungen an den neuen Beton

Im Allgemeinen dient als wesentliche Kenngröße bei der Wahl des geeigneten Betons die Ofenkurve, woraus sich die Anforderungen an die Temperaturwechselbeständigkeit ergeben. Der vorliegende Referenzbeton findet seine Verwendung bei Vergütungsöfen der Stahlindustrie. Im Vergütungssofen sind die Anforderungen an die Materialfestigkeiten für einen Schamottebeton besonders hoch. Der Referenzbeton erfährt massive mechanische Belastungen wie Abrieb und Druck z.B. durch Heraus- oder Hereinschiebens eines kalten Ofenwagens in den warmen Ofenraum und Temperaturwechselbeanspruchungen vor allem am Rand des Ofenwagens.

Eine Möglichkeit wäre es, auf einen teureren auf Silimanit oder gar Mullit basierenden Feuerbeton zu wechseln. Dies ist aber kaufmännisch nicht darzustellen.

Ein besonderes Augenmerk liegt hier nun bei der Abriebfestigkeit, weshalb dieser Feuerbeton zur Weiterentwicklung mit UHPC-Technologie herangezogen wurde.

5.3 Untersuchungen des Referenzbetons

5.3.1 Allgemeine Angaben zum Referenzbeton

Der zur Verfügung gestellte Feuerbeton mit Schamottzuschlägen fällt nach Klassifikation gemäß Norm DIN EN 1401-1 in die Gruppe des „Medium cement“-Feuerbeton.

Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, setzt sich der Feuerbeton in theoretisch abgeschätzten chemischen Anteilen aus ca. 3,8 M.-% Kalziumoxid (CaO) und ca. 51,6 M.-% Tonerde (Al_2O_3)

zusammen. Als feuerfeste Phase liegt in der Hauptmenge Mullit vor (63). Im Allgemeinen wandelt sich Kaolinit bei etwa 1200°C durch Metamorphose in Mullit um (72). Mullit wird bereits größtenteils durch die verwendete Schamotte in die Betonmischung eingebracht. Jedoch werden sich bei einer ausreichend hohen Brenntemperatur (über 1000°C) aus der freien Tonerde (Alodur) und dem als Fließmittel eingebrachten Silubit weitere Mullite bilden. Aufgrund einer Temperaturbeanspruchung von bis zu 1400°C konnte eine Reaktion der freien Tonerde mit dem CA_2 bei vorliegenden Versuchsreihen stattfinden.

Der Versatz des untersuchten Feuerbetons und die Analysen und Voruntersuchungen der verwendeten Rohstoffe wird eingehend im Kapitel 4. beschrieben.

5.3.2 Verwendete Normen

Folgende Normen wurden im Allgemeinen bei der Durchführung der Versuche beachtet:

Aus dem Feuerfestbereich (73):

- DIN V ENV 1402-3 1998-12 Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse – Teil 3: Prüfung im Anlieferungszustand
- DIN V ENV 1402-4 1999-05 Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse – Teil 4: Bestimmung der Konsistenz von Feuerbetonen
- DIN V ENV 1402-5 1999-05 Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse – Teil 5: Herstellung und Behandlung von Probekörpern
- DIN V ENV 1402-6 1998-03 Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse – Teil 6: Bestimmung der physikalischen Eigenschaften

Aus der Betontechnologie:

- Zusammenstellung der Prüfverfahren (PVB) gemäß ÖNORM B 3303 „Betonprüfung“ (74)

5.3.3 Angaben zur Versuchsdurchführung

5.3.3.1 Probenbezeichnungen

Die Proben wurden vom Institut für Baustofflehre für eine rasche Identifikation folgendermaßen bezeichnet:

[Datum]_[Versatznummer] [Serienbezeichnung] [Nr.PK]

Dabei bedeuten im konkreten Fall:

[Datum]	[Jahr][Monat][Tag] in numerischer Form (Bsp. 20130718)
[Versatznummer]	Versatznummer (i.d.R 01= Versatz für Referenzbeton)
[Serienbezeichnung]	alphabetische Angabe über die Serie
[Nr.PK]	fortlaufende Nummer des Probekörpers in der Serie

Beispiel:

20130718_01 A1 bis 20130718_01 A3

Bedeutet in diesem Fall, dass die Prismen (4 x 4 x 16 cm) 1 bis 3 am 18. Juli 2013 mit dem Referenzversatz hergestellt wurden.

5.3.3.2 Probenherstellung

Die Proben wurden in Anlehnung an folgende Normen hergestellt:

Aus dem Feuerfestbereich:

- DIN V ENV 1402-5 1999-05 Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse – Teil 5: Herstellung und Behandlung von Probekörpern (73)

Aus der Betontechnologie:

- ÖNORM EN 12390-1:2001 Abschnitt 3 Begriffe, Abschnitt 4 Form, Maße und zulässige Abweichungen von Probekörpern und Abschnitt 5 Formen (74)

Aufgrund des vorgegebenen Forschungsziels wurden die Probekörper gemäß der in der Zement- und Mörtelprüfung genormten Prismengröße von 4 x 4 x 16 cm hergestellt.⁵

5.3.3.3 Verdichten

Im Anschluss an die hergestellte und in die Schalung eingebrachte Mischung wurden die Probekörper durch Vibration bei mind. 40 Hertz gemäß ÖNORM B 3303 verdichtet (74).

5.3.3.4 Probennachbehandlung

Gemäß Feuerfestnorm wurden „nach beendeter Formgebung“ die fertigen Probekörper „in einem luftdicht schließenden Kunststoff sack gelagert“ und nach 24 h aus den Formen genommen (73). Für weitere 24 h wurden die Prismen über Wasser gelagert (Lagerung bei 100% Luftfeuchtigkeit).

⁵ Feuerfestbereich: 64 x 54 x 230 mm bzw. 64 x 64 x 230 mm

5.3.3.5 Aufheizprozess

Bei den vorliegenden Versuchsreihen wurden die Probekörper in einem elektrisch beheizten Kammerofen mit einer frei programmierbaren Steuerung des Fabrikats Rhode getempert bzw. gebrannt.

Unter Berücksichtigung der Aufheizraten und Haltezeiten (siehe nächster Absatz) wurden folgende maximalen Brenntemperaturen für die benötigten Untersuchungen der Probekörper definiert:

- 600°C
- 800°C
- 1000°C
- 1200°C
- 1400°C (Anmerkung: die Brenntemperatur von 1400°C wurde nicht erreicht, da es zwischen 1100 und 1400°C zu einem Stromausfall am Ofen gekommen ist.)

In der Feuerfestindustrie wird die sogenannte Aufheizkurve in der ENV 1402-5 geregelt. In dieser Arbeit wurden in Anlehnung an die Aufheizkurve der ENV 1402-5 die genauen Aufheizraten und Haltezeiten von Seite der Fördergeber vorgegeben (siehe Bild 5.1).

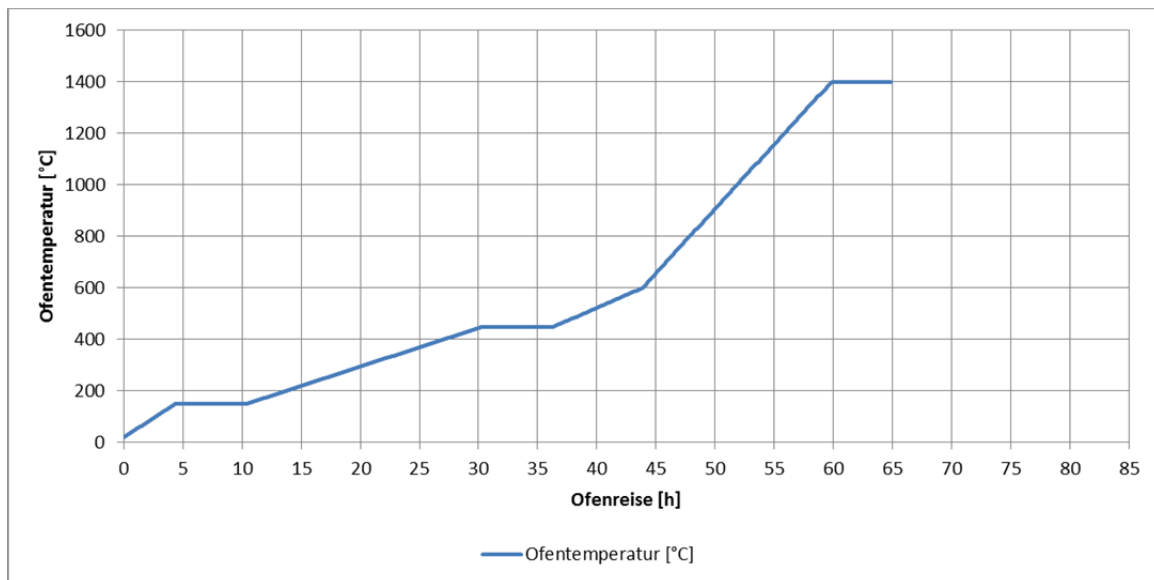


Bild 5.1: Aufheizkurve und Haltezeiten der Probekörper lt. Hersteller

5.3.3.6 Hergestellte und untersuchte Proben

Am Institut für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit wurden im Zuge der Untersuchung des Referenzbetons sechs Probenserien mit jeweils drei prismenförmigen

Probekörpern hergestellt. Die Probeserien sind in Tabelle 5.1 genau nach Probenbezeichnung, Maximaltemperatur während des Aufheizprozesses und Prüfumfang aufgelistet.

Tabelle 5.1: Übersicht über die hergestellten Proben und dem Prüfumfang für die Untersuchung des Referenzbetons

Probenbezeichnung	max. Temperatur	Prüfumfang
20130616_01 A	Grünzustand	• Biegezugfestigkeit, • Druckfestigkeit, • Thermische Analyse (TG/DSC), • Porosimetrie
20130616_01 B	600 °C Anm.: keine Haltezeit bei Maximaltemperatur	• Biegezugfestigkeit, • Druckfestigkeit, • Thermische Analyse (TG/DSC), • Porosimetrie
20130616_01 C	800 °C Anm.: keine Haltezeit bei Maximaltemperatur	• Biegezugfestigkeit, • Druckfestigkeit, • Thermische Analyse (TG/DSC), • Porosimetrie
20130718_01 A	1000 °C	• Biegezugfestigkeit, • Druckfestigkeit, • Thermische Analyse (TG/DSC), • Porosimetrie
20130708_01 B	1200 °C	• Biegezugfestigkeit, • Druckfestigkeit, • Thermische Analyse (TG/DSC), • Porosimetrie
20130708_01 A	1400 °C Anm.: vermutete max. Brenntemperatur, Haltezeit unbekannt (Unbemerkte Notabschaltung des Ofens während Ofenreise)	• Biegezugfestigkeit, • Druckfestigkeit, • Thermische Analyse (TG/DSC), • Porosimetrie

Für diese Arbeit von Bedeutung sind die Auswertungen der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen sowie der Porosimetrie. Auf diese wird in folgenden Abschnitten 5.4 und 5.5 eingegangen.

5.4 Festigkeitsprüfungen

5.4.1 Verfahren und Prüfvorschriften

Das Prüfen der Biegezug- und Druckfestigkeiten wurde auf Basis der ÖNORM EN 196-1:2005-05 „Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit“ durchgeführt.

Die vorliegenden Probekörper weisen eine Prismengröße von 4 x 4 x 16 cm auf.



Bild 5.2: (links) Schalungen mit 4 x 4 x 16 cm

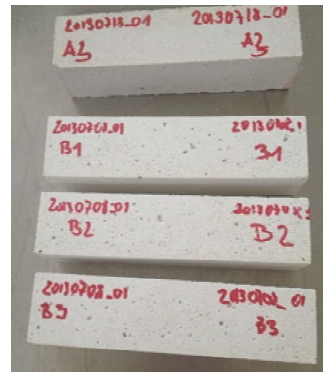


Bild 5.3: (rechts) Fertige Probekörper mit 4 x 4 x 16 cm

Prüfung der Druckfestigkeit:

Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden mit einer hydraulischen Prüfmaschine der Fa. TONI Technik Modell 2040 durchgeführt (Bild 5.4).



Bild 5.4: Maschine Fa. TONI Technik Modell 2040 zum Messen der Druckfestigkeit (4)

Gemäß Norm ist die Last erschütterungsfrei und „gleichmäßig auf den Probekörper aufzubringen, die Belastung stetig mit einer Geschwindigkeit von 0,2 MPa/s bis 1,0 MPa/s bis zum Erreichen der Höchstlast zu steigern“ (74 S. 45).

Die Druckfestigkeit wurde gemäß Norm mit Hilfe folgender Gleichung ermittelt:

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

Dabei ist:

f_c die Druckfestigkeit in N/mm²

F die Höchstlast in Newton

A_f Fläche des Probenquerschnittes, auf den die Druckbeanspruchung wirkt in mm²

Formel 5-1: Formel zur Berechnung der Druckfestigkeit (74 S. 45)

Prüfung der Biegezugfestigkeit:

Die Biegezugfestigkeitsprüfungen wurden mit einer mechanischen Universalprüfmaschine der Fa. Zwick, Typ 250Z durchgeführt (Bild 5.5 und Bild 5.6).



Bild 5.5: (links) Biegezugfestigkeitsprüfung

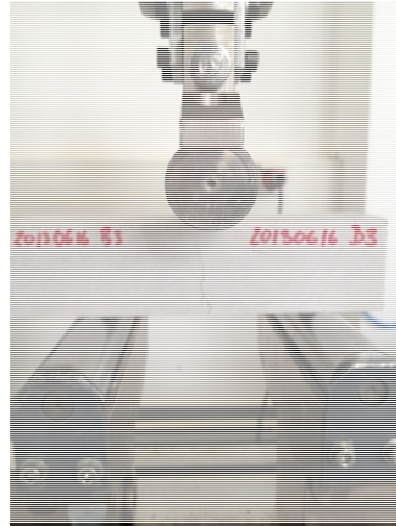


Bild 5.6: (rechts) Momentaufnahme einer Biegezugfestigkeitsprüfung

Gemäß Norm wurde die Last „stossfrei aufgebracht und innerhalb des Bereichs von 0,04 MPa/s bis 0,06 MPa/s bei einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit $\pm 1\%$ solange gesteigert, bis keine höhere Last mehr aufgenommen“ werden konnte (74 S. 47).

Die Biegezugfestigkeit wurde gemäß Norm mit Hilfe folgender Gleichung ermittelt:

$$f_{ct} = \frac{3 F l}{2 d_1 d_2^2}$$

Dabei sind:

- | | |
|-----------------|---|
| f_{ct} | die Biegezugfestigkeit in N/mm ² |
| F | die Höchstlast in Newton |
| l | der Abstand zwischen den Auflagerrollen in Millimeter |
| d_1 und d_2 | die Seitenmaße des Querschnitts in Millimeter |

Formel 5-2: Formel zur Berechnung der Biegezugfestigkeit (74 S. 47)

5.4.2 Druckfestigkeiten - Ergebnisse

In dieser Arbeit wurden an den Probekörpern der Referenzmischung sowohl Druck- als auch Biegezugfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Je nach Prüfserie wurde die Druckfestigkeit an den bereits erkalteten Prüfkörpern in Abhängigkeit der jeweils maximalen Brenntemperatur festgestellt.

In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeiten (Mittelwerte) in Abhängigkeit der maximalen Brenntemperatur zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Aufstellung der Druckfestigkeiten (Mittelwert) des Referenzbetons in Abhängigkeit der Brenntemperatur

Probenbezeichnung	max. Temperatur	Druckfestigkeit (Mittelwert) in N/mm ²
20130616_01 A	Grünzustand	119,6
20130616_01 B	600°C Anm.: keine Haltezeit bei Maximaltemperatur	96,8
20130616_01 C	800°C Anm.: keine Haltezeit bei Maximaltemperatur	66,7
20130718_01 A	1000°C	79,1
20130708_01 B	1200°C	72,9
20130708_01 A	1400°C Anm.: vermutete max. Brenntemperatur, Haltezeit unbekannt (unbemerkte Notabschaltung des Ofens während des Brandes)	92,3

In Bild 5.7 wird die Kaltdruckfestigkeit in einer Graphik in Abhängigkeit der Brenntemperatur abgebildet. Wie man erkennen kann, weist der verwendete Feuerbeton bei einer Grünfestigkeit (ca. 20°C) die höchste Druckfestigkeit von ca. 120 N/mm² auf und fällt bei Temperaturanstieg stetig ab. Der Tiefpunkt ist bei 800°C erreicht. Danach kommt es bis zu 1000°C zu einer langsamen Festigkeitssteigerung. Bis 1200°C kommt es erneut zu einem leichten Abfall und ab 1200°C zu einem weiteren Anstieg. Es ist anzunehmen, dass die Festigkeit über 1400°C weiter leicht ansteigt. Allerdings kam es während des Brennvorganges kurz vor 1400°C zu einer Notabschaltung des Brennofens.

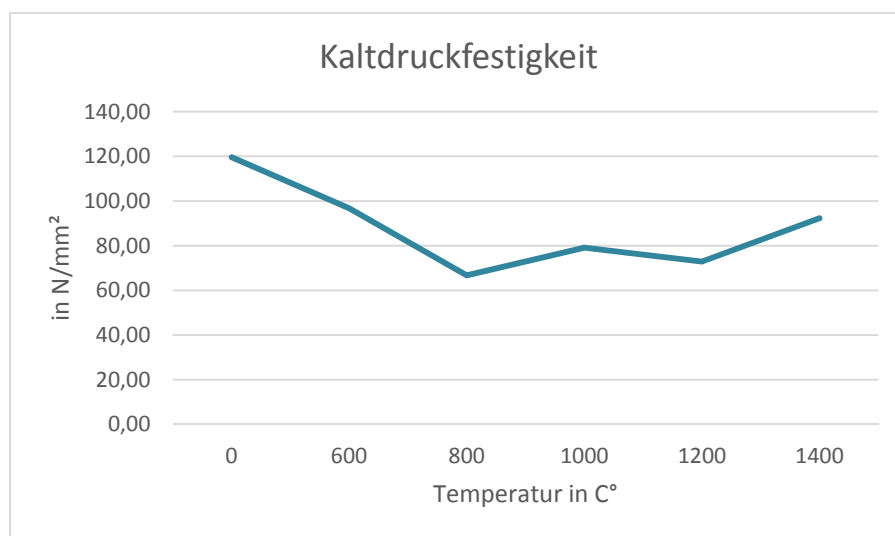


Bild 5.7: Darstellung der gemittelten Kaltdruckfestigkeiten in Abhängigkeit der Brenntemperatur

Vergleicht man die Ergebnisse der Kaltdruckfestigkeitsprüfungen im Detail (siehe Bild 5.8), so kann man erkennen, dass die Abweichungen und die Streuung der einzelnen Proben minimal sind.

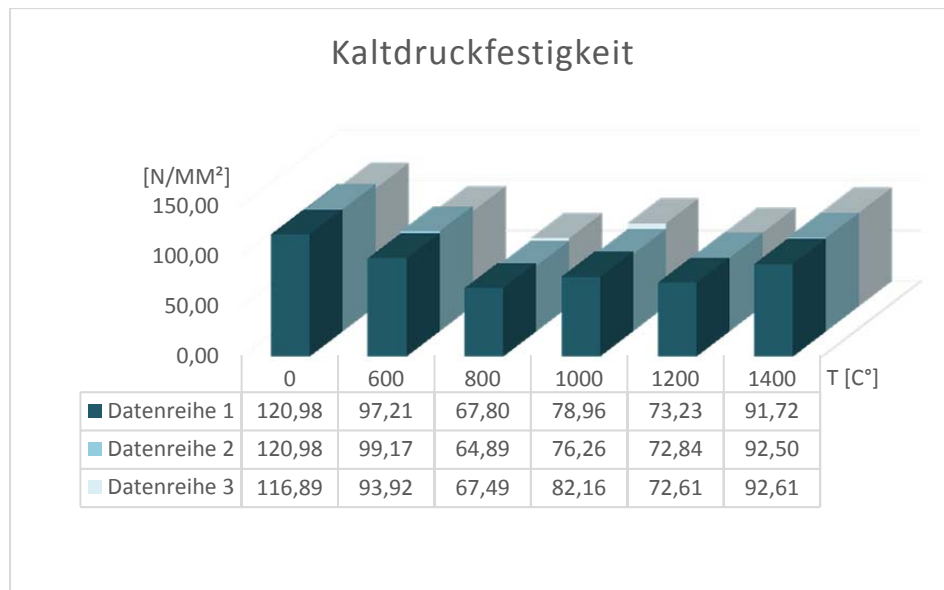


Bild 5.8: Auswertung der Kaltdruckfestigkeiten der einzelnen Probenserien

5.4.3 Zugfestigkeiten – Ergebnisse

Die Biegezugfestigkeit wurde ebenfalls an den erkalteten Prüfkörpern in Abhängigkeit der jeweils maximalen Brenntemperatur geprüft. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten (Mittelwert) in Abhängigkeit der maximalen Brenntemperatur zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Aufstellung der Biegezugfestigkeiten (Mittelwert) des Referenzbetons in Abhängigkeit der Brenntemperatur

Probenbezeichnung	max. Temperatur	Zugfestigkeit (Mittelwert) in N/mm ²
20130616_01 A	Grünzustand	9,9
20130616_01 B	600°C Anm.: keine Haltezeit bei Maximaltemperatur	10,3
20130616_01 C	800°C Anm.: keine Haltezeit bei Maximaltemperatur	7,3
20130718_01 A	1000°C	11,2
20130708_01 B	1200°C	10,7
20130708_01 A	1400°C Anm.: vermutete max. Brenntemperatur, Haltezeit unbekannt (unbemerkte Notabschaltung des Ofens während des Brandes)	13,9

In Bild 5.7 wird die Biegezugfestigkeit in einer Graphik in Abhängigkeit der Brenntemperatur abgebildet. Die Grünfestigkeit ist bei der Biegezugfestigkeit im Gegensatz zur Kaltdruckfestigkeit eher gering. Ein sehr ähnliches Bild weist der Abfall bei 800°C und bei 1200°C auf, wobei die geringste Festigkeit bei 800°C liegt. Ab 1200°C kommt es zu einem verhältnismäßig rasanten Anstieg der Biegezugfestigkeit, die letztendlich bei 1400°C den über die Temperaturkurve verteilt höchsten Wert

erreicht. Auch hier ist auf die Notabschaltung des Brennofens kurz vor dem Erreichen der 1400°C hinzuweisen.

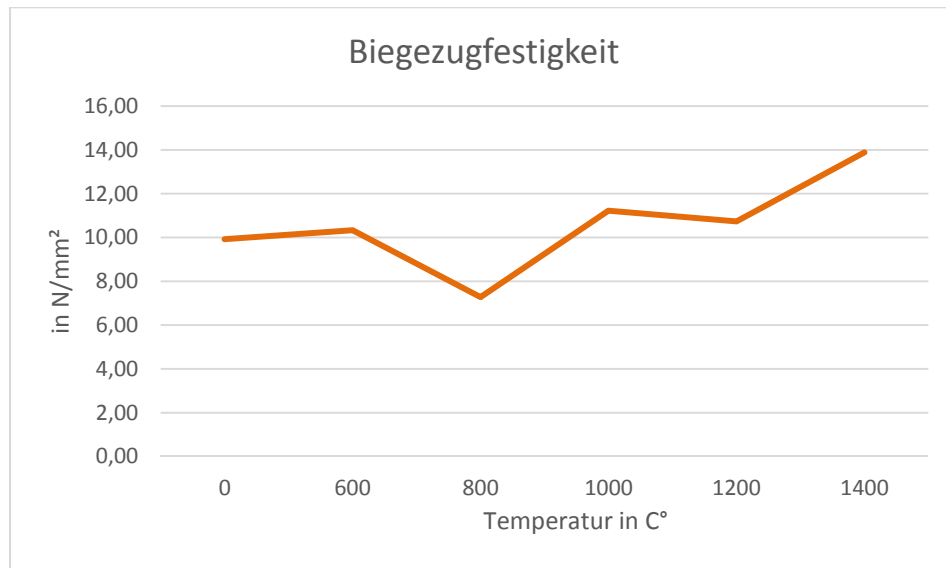


Bild 5.9: Darstellung der gemittelten Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Brenntemperatur

Die Abweichungen der einzelnen Proben voneinander ist bei den Ergebnissen der Biegezugfestigkeitsprüfungen (siehe Bild 5.10) stärker als bei der Kaltdruckfestigkeit. So erkennt man in Bild 5.10 ein paar größere Streuungen bei den ungebrannten Proben im Vergleich zu jenen, die auf 1000°C und 1200°C erhitzt wurden.

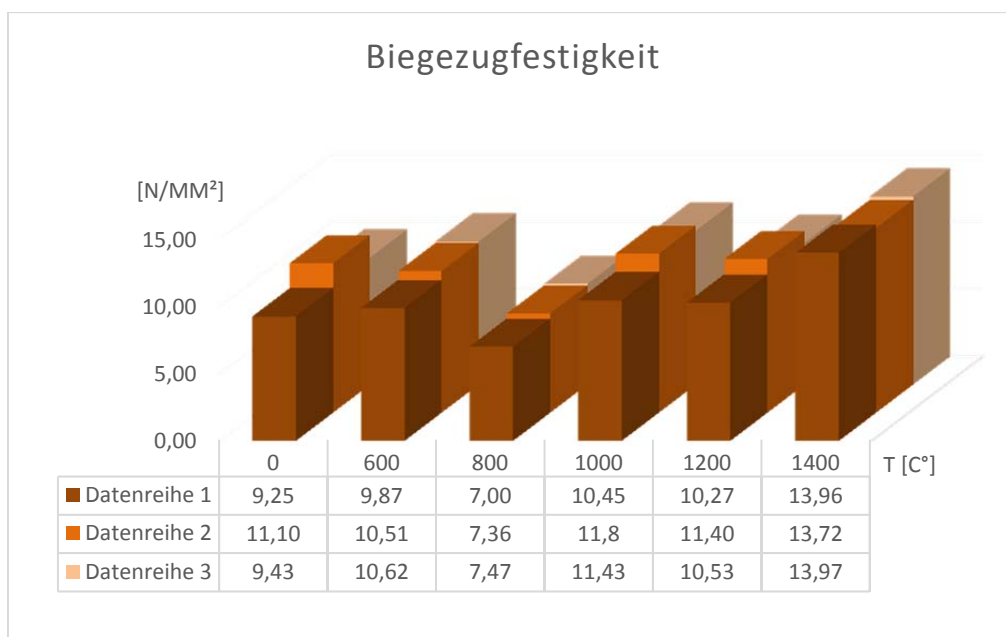


Bild 5.10: Auswertung der Biegezugfestigkeiten der einzelnen Probenreihen

5.4.4 Interpretation

Im Temperaturbereich zwischen 600°C und 800°C sinkt die Festigkeit des Feuerbetons markant. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die hydraulische Bindung zum Teil zerstört wird und noch keine hydraulische Bindung eingesetzt hat.

Der erneute Festigkeitsabfall bei über 1000°C wird durch die Schamotte, bei der es zur Bildung von Schmelzphasen kommt, verursacht. Der CaO-Anteil des Zements (Flussmittel) setzt die Festigkeit weiter herab. Die Mullitisierung, die Reaktion der Tonerde mit dem freien SiO₂ des Silubits (Mikrosilika), setzt Temperatur von 950°C (47 S. 45) erst langsam ein und kann erst später die Festigkeiten merklich steigern.

5.5 Porosität

5.5.1 Messverfahren und Prüfvorschriften

Wie bereits erwähnt, beeinflusst die Porosität eine Vielzahl an Eigenschaften (Festigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit uvm.) von Betonen und keramischen Werkstoffen. Um den Werkstoff diesbezüglich charakterisieren zu können, ist die Ermittlung des Porenvolumenanteils sowie der Porengrößenverteilung von großer Bedeutung. Bei der Wahl der Prüfverfahren ist zu beachten, welcher Porenbereich erfasst werden soll (54).

Die Messung der Porosität kann im Wesentlichen mit Hilfe von drei Verfahren durchgeführt werden:

- 1) Wasser-Luft-Verdrängungsverfahren im Messbereich von 1 - 100 µm: zu Beginn wird mit Wasser eine Sättigung der Probekörper herbeigeführt. Die Porengröße wird durch das Herauspressen des Wassers mit Hilfe von schrittweise eingebrachtem Luftdruck ermittelt. (Druck ist indirekt proportional zur Porengröße) (54).
- 2) Quecksilberporosimeter im Messbereich von 0,005 – 1000 µm: Da mit Quecksilber keine Benetzung der Keramik erreicht wird, werden bei der Quecksilberporosimetrie die offenen Poren mittels Druck gefüllt. Auch hier wird mit Hilfe dieses Verfahrens die Porengröße durch die Druckveränderung erfasst (54).
- 3) Adsorption im Messbereich von 0,0005 – 0,04 µm: Dieses Verfahren wird bei sehr kleinen Poren (wie in Pulver) eingesetzt. Die Adsorption von Stickstoff ermöglicht es, ganz feine Gefügestrukturen nicht zu zerstören (54).

In der vorliegenden Arbeit wurde die Porosität der Probenserien mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie ermittelt.

Die vorliegenden Versuchsreihen wurden im Besonderen in Anlehnung an die DIN V ENV 1402-6 1998-03 Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse – Teil 6: Bestimmung der physikalischen Eigenschaften (73) und an die Prüfvorschriften aus der „Zusammenstellung der Prüfverfahren Beton gemäß ÖNORM B 3303 Betonprüfung“ (74) durchgeführt.

5.5.2 Porosimetrie – Ergebnisse und Interpretation

Für diese Arbeit wurden neben den Festigkeitsuntersuchungen auch die Analysen der Porenstrukturen durchgeführt. Dazu wurden die Probekörper der Referenzmischungen der Quecksilberporosimetrie unterworfen. Je nach Prüfsérie wurde die Porosität an den Prüfkörpern in Abhängigkeit der jeweils maximalen Brenntemperatur festgestellt. In Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse der Gesamtporosität der Prüfkörper des Referenzbetons in Abhängigkeit der maximalen Brenntemperatur abgebildet.

Tabelle 5.4: Aufstellung der Gesamtporosität des Referenzbetons in Abhängigkeit der Brenntemperatur

Probenbezeichnung	max. Temperatur	Porosität Vol.-%
20130616_01 A	Grünzustand	7,02
20130616_01 B	600°C Anm.: keine Haltezeit bei Maximaltemperatur	13,73
20130616_01 C	800°C Anm.: keine Haltezeit bei Maximaltemperatur	17,34
20130718_01 A	1000°C	20,44
20130708_01 B	1200°C	20,03
20130708_01 A	1400°C Anm.: vermutete max. Brenntemperatur, Haltezeit unbekannt (unbemerkte Notabschaltung des Ofens während des Brandes)	18,71

Der Verlauf der Porosität wird in Bild 5.11 dargestellt. Allgemein lässt sich feststellen, dass die Gesamtporosität mit der Brenntemperatur zunimmt. Jedoch ab einer Temperatur von 1000°C fällt sie wieder leicht ab.

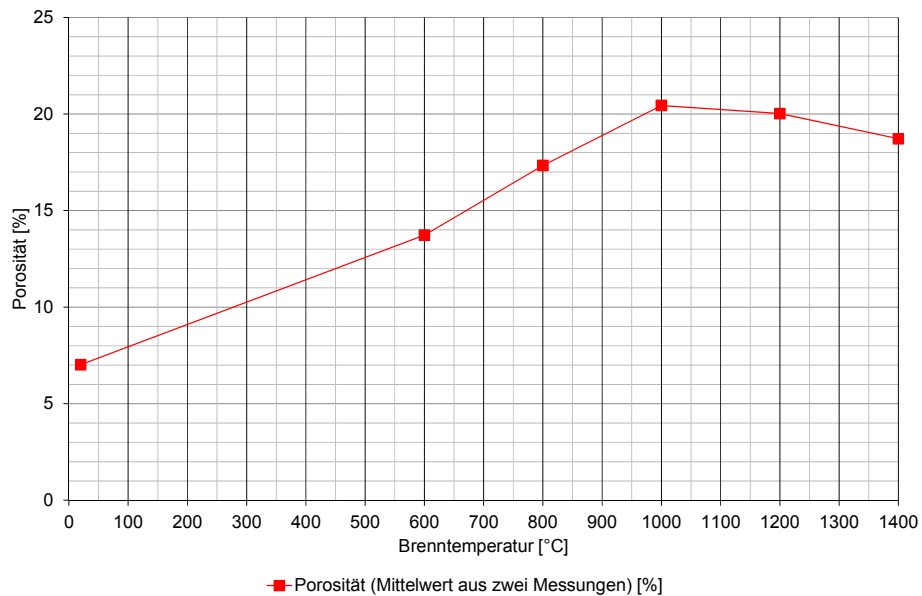


Bild 5.11: Darstellung der Gesamtporosität als Verlauf in Abhängigkeit der Brenntemperatur

Im Bild 5.12 ist der Porendurchmesser der Probekörper ja nach Brenntemperatur bezogen auf den kumulativen Porenanteil abgebildet. Man kann erkennen, dass die Größe des Porendurchmessers mit der Brenntemperatur steigt. Vergleicht man die kumulative Verteilung aus Bild 5.12 mit der Gesamtporosität aus Bild 5.11 kann man erkennen, dass sich neben der Veränderung des Porenanteils im Allgemeinen auch die Art und Größen der Poren in Abhängigkeit von der maximalen Brenntemperatur verändern. Bild 5.12 zeigt, dass sich im Vergleich zur Probe im Grünzustand jene bei Brenntemperaturen bis 800°C kleine und große Poren neu bilden. Die kleinen Poren verschwinden ab einer Brenntemperatur von 1000°C und werden durch die Neubildung größerer Poren mit einem Durchmesser von 1 -10 µm „ersetzt“. Nach *Lebeda* (63) kann dieses Verhalten „auf die beim Brennprozess ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge zurückgeführt werden.“

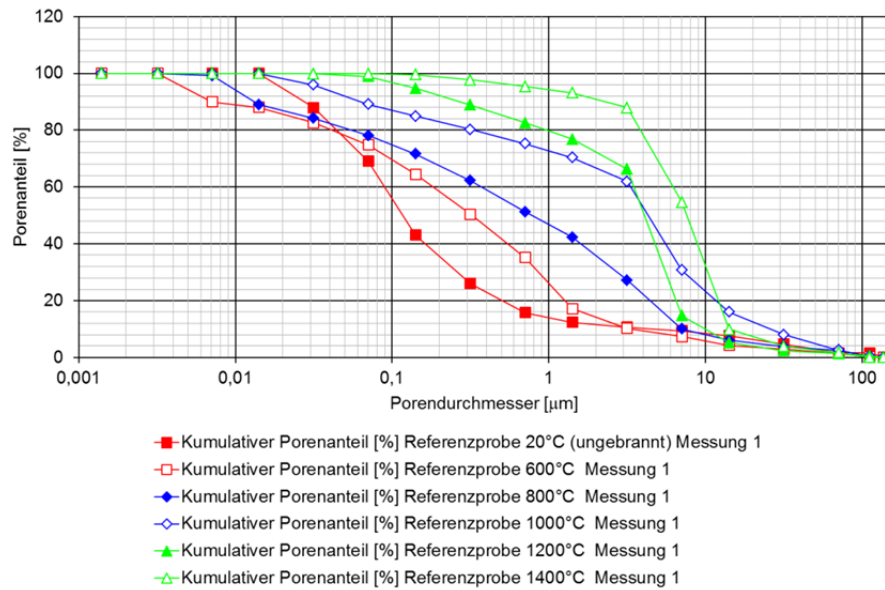


Bild 5.12: Die Verteilung des Porendurchmessers (kumulativ) bei verschiedenen Brenntemperaturen

Betrachtet man die relativen Anteile der Porendurchmesser der Prüfkörper (siehe Bild 5.13) erkennt man auch hier eine Veränderung der Porengröße bei Steigerung der Brenntemperatur.

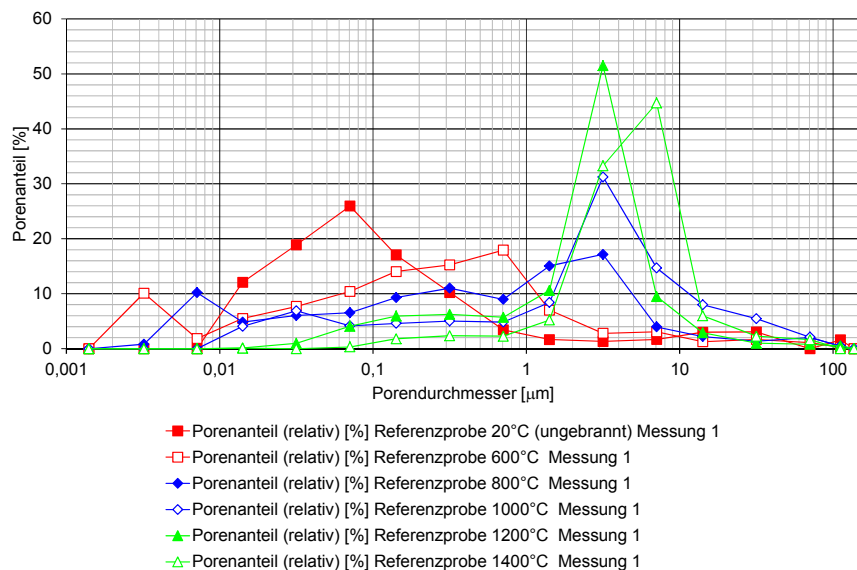


Bild 5.13: Relative Anteile der Porendurchmesser in den Referenzproben bei verschiedenen Brenntemperaturen

Die Veränderung der Porenanteile und Porendurchmesser im Bereich der Gelporen sind besonders markant in Hinblick auf die unterschiedlichen Brenntemperaturen. Eine genauere Darstellung wird in Bild 5.14 aufgezeigt. Hier sieht man, dass die Entwicklung der Poren mit einem Durchmesser zwischen 3 und 70 nm im Temperaturbereich von 20 bis ca. 1400 °C. Bei den Proben im Grünzustand (20°C) sind die Gelporen wassergefüllt. Bei einer Brenntemperatur von 600°C bis 800°C zeigt die Auswertung eine starke Steigerung der Gelporen mit einem mittleren Porendurchmesser von 0,0071

µm. Generell sinkt der Anteil der Poren im Bereich von 3 – 70 nm mit steigender Temperatur. Dies lässt sich auf Phasenmodifikationen und Sintervorgänge zurückführen (63).

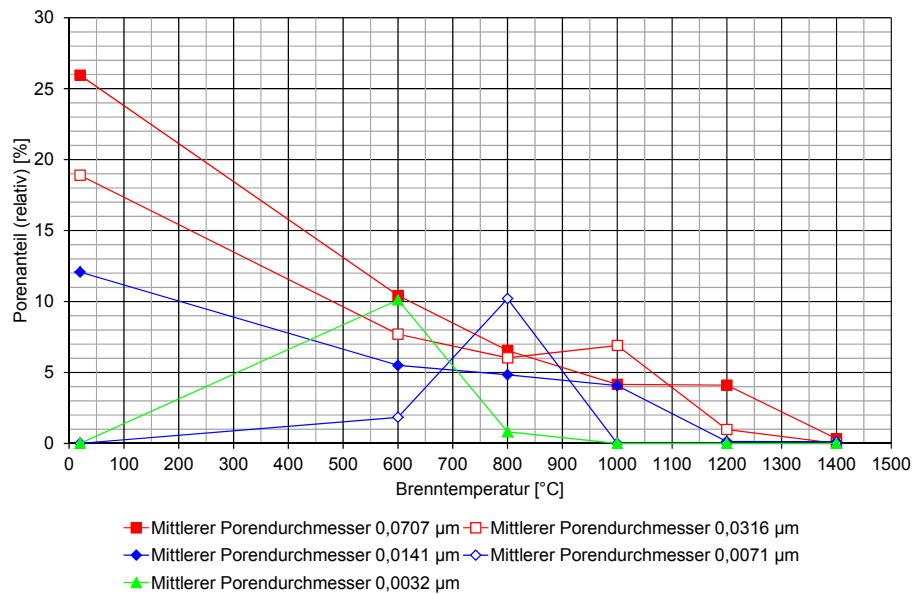


Bild 5.14: Entwicklung des Anteils an Poren mit einem Durchmesser zwischen 3 und 70 nm in Abhängigkeit der Brenntemperatur

Betrachtet man im Bild 5.15 die Entwicklung der Porenanteile mit einem größeren Durchmesser im Bereich von 0,7 bis 70 µm erkennt man, dass der Porendurchmesser im Bereich von 3 µm bis 14 µm bei einer Brenntemperatur von 1200°C bis 1400°C ansteigt.

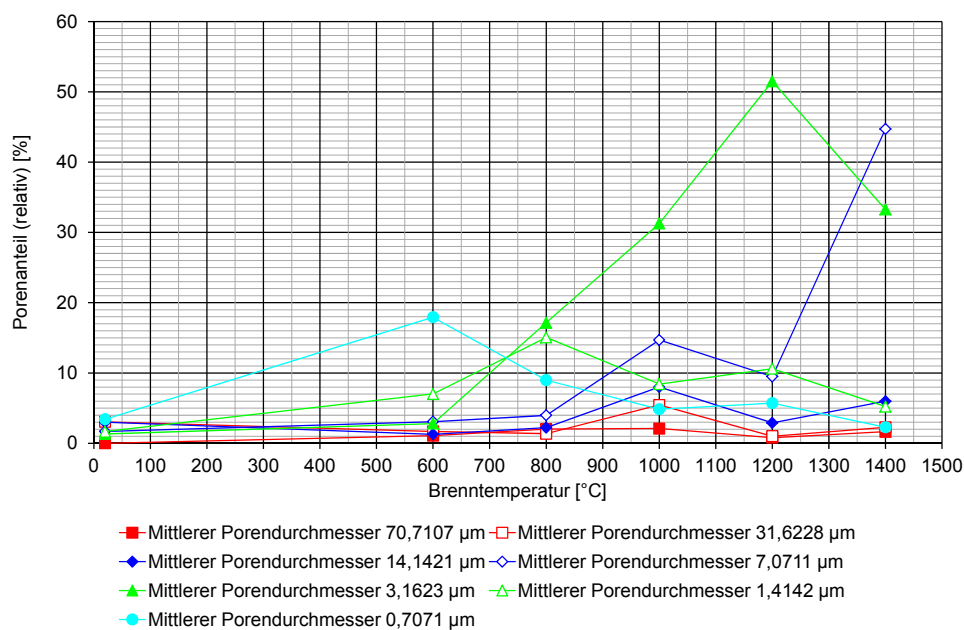


Bild 5.15: Entwicklung des Anteils an Poren mit einem Durchmesser zwischen 0,7 bis 70 µm in Abhängigkeit der Brenntemperatur

Durch Vergleichen der absoluten Porenanteile der Referenzproben konnten die Auswirkungen von chemischen sowie physikalischen Vorgängen der Keramisierung auf die Porosität dargestellt werden. Das Bild 5.16 zeigt die kumulativen Porenverteilungen der Referenzproben (d.h. die Summe aller Porendurchmesser ergibt die Gesamtporosität). Im Bild 5.17 ist der Anteil der verschiedenen Porendurchmesser in der Probe übersichtlich dargestellt. Die ebenfalls abgebildete Porenverteilung des Hauptausgangstoffes (Schamotte/Clayrac, ca 70 M.-%) dient als Vergleich mit dem Referenzbeton. Die geringste Porosität weist die Betonprobe im Grünzustand auf, bei dem die Porosität sich beinahe in der Höhe der Porosität des Zuschlagstoffes befindet. Deutlich zu erkennen ist die Abnahme des Anteils an größeren Poren. Dies ist laut *Lebeda* (63) darauf zurückzuführen, dass diese Poren ggf. durch die Feinstzuschläge (in der Regel Tonerde, Sillubit) gefüllt werden.

Im Bild 5.17 ist deutlich das Porenwachstum im Bereich von 1 bis 10 μm Porendurchmesser durch die thermische Behandlung zu erkennen.

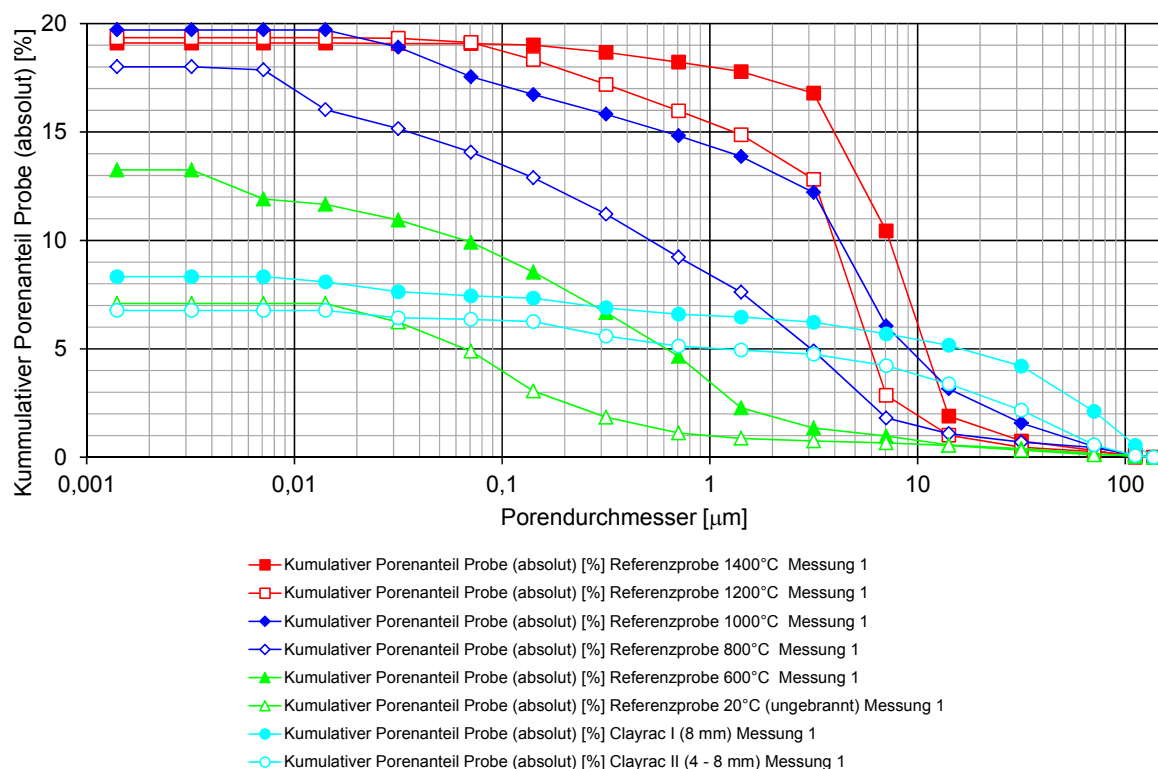


Bild 5.16: Kumulative Anteile des Porenvolumens in der Probe

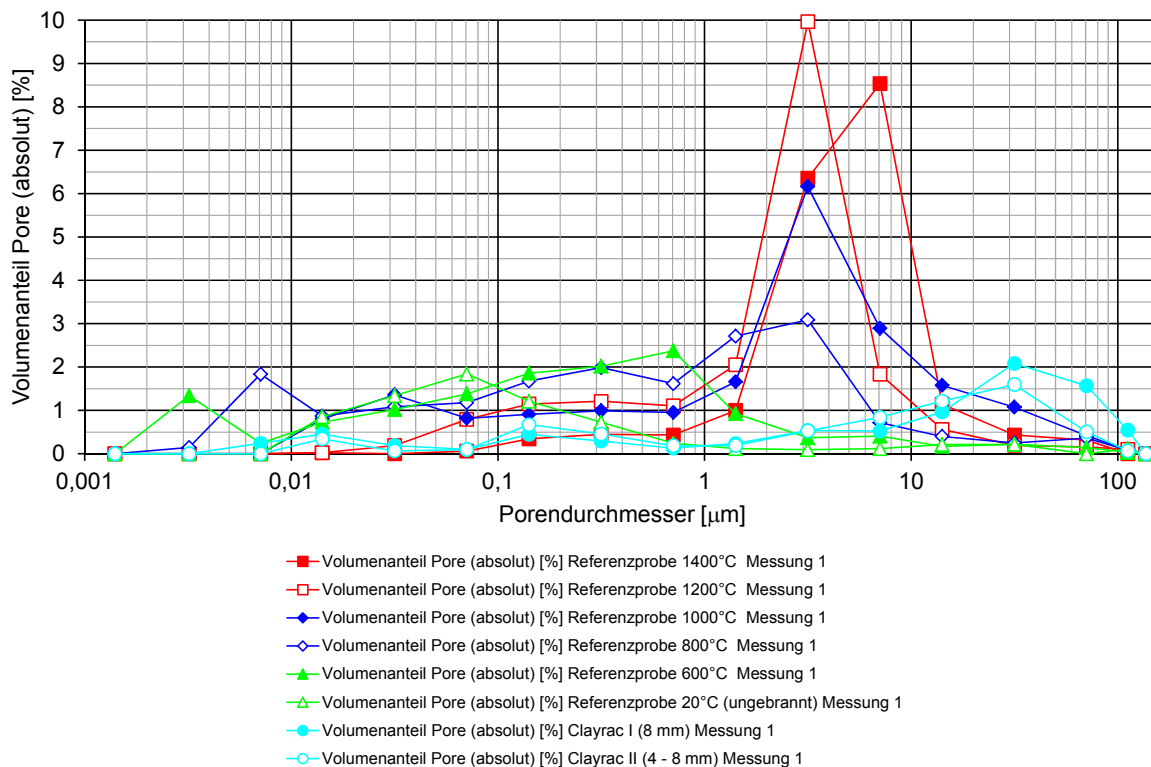


Bild 5.17: Anteile des Porenvolumens in der Probe

5.6 Ansätze zur Festigkeitssteigerung

Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen des vorliegenden Feuerbetons durch Charakterisierung der Rohstoffe, Analyse der Kornverteilungen und Porosität sowie Messung der Kaltdruck- und Kaltbiegefestigkeiten können folgende Ansätze für eine Steigerung der Festigkeiten gefunden werden:

- Adaptierungen im Bindersystem z.B. durch Reduzierung des Zementanteils bzw. Verwendung von Phosphatbindern an Stelle des Zements
- Optimierung der Packungsdichte und der Kornverteilung unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften des Betons.

Im Temperaturbereich von 800°C bis 1000°C, in dem die baupraktischen Anforderungen an den vorliegenden Feuerbeton am höchsten sind, kommt es zu einer Zerstörung der hydraulischen Bindung und einem damit einhergehenden Festigkeitsverlust. In der Literatur finden sich Hinweise auf eine mögliche Festigkeitssteigerung durch Reduzierung des Zementanteils. Weiters könnte der Einsatz von Phosphatbindern dieses „Festigkeitsloch“ bis zum Einsetzen der keramischen Bindungen überbrücken. Bei diesen Untersuchungen sind Prozesse im Hinblick auf Phasenumwandlungen und -neubildungen, Kristallisation oder Dehydratisierung zu beachten.

Der Ansatz aus der UHPC-Forschung, die Optimierung der Packungsdichte, wirft im Feuerfestbereich mehrere Fragen auf. Der Feuerbeton kann im Grünzustand die optimale Packungsdichte aufweisen. Jedoch verändern sich beim Brand, wie die durchgeführten porosimetrischen Untersuchungen zeigen, das Porenbild sowie die Porenverteilungen merklich, wobei auch die Packungsdichte nicht mehr als optimal anzusehen ist. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass während des Erhitzens unterschiedliche chemische und physikalische Reaktionen die Gefügestruktur beeinflussen. Generell verändern Schmelz- und Sintervorgänge die Porenstruktur feuerfesten Materials. Das bedeutet auch, dass eine optimale Packungsdichte im Grünzustand nicht automatisch zu einer optimalen Packungsdichte, und damit einer Verringerung der Porosität, bei der erwünschten Einsatztemperatur führt. Generell kann zum Weiterführen dieses Ansatzes als nächster Schritt eine Untersuchung der Korngrenzen zwischen den Bindemittel- und Feinstkornanteilen (Mikrosilika, Tonerde) und den feuerfesten Zuschlagsstoffen vorgenommen werden. Auch kann in weiteren Versuchsreihen die sehr kantige Kornform der Schamotte näher betrachtet werden. Eine mögliche Abrundung der unförmigen Körnungen kann die Packungsdichte im Grünzustand erhöhen und möglicherweise zu einer Festigkeitssteigerung führen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklungen in der Forschung der Ultrahochfestbetontechnologie hatten in den letzten Jahren primär die Festigkeitssteigerung im Fokus. Die sehr hohen Druckfestigkeiten ($> 150 \text{ N/mm}^2$) sowie die besonders hohe Widerstandsfähigkeit gegen physikalischen und chemischen Angriff sind großteils auf Ansätze bei der Optimierung der Packungsdichte, Steigerung der Homogenität des Gefüges, Verringerung der Porosität oder durch Reduzieren des Größtkornanteils zurückzuführen.

Im Gegensatz dazu sind die Anforderungen an Feuerbetone aufgrund der Beanspruchung sehr hoher Temperaturen (etwa 600°C bis 2000°C) im Vergleich sehr vielfältig. Diese vielen Eigenschaften, die aufgrund der hohen Temperaturbeanspruchungen gefordert werden, stellen die Feuerfestindustrie vor große Herausforderungen. Fokus dieser Arbeit war die Festigkeitssteigerung aufgrund der hohen mechanischen Belastungen wie Abrieb und Druck im Einsatzbereich der Feuerbetone.

In unterschiedlichen Versuchsreihen wurden die Festigkeiten, Porosität und Kornverteilung eines vorliegenden Referenzbetons untersucht und Ansätze aus der Betontechnologie ultrahochfester Betone abgeleitet, die eine Festigkeitssteigerung bewirken könnten ohne dabei die bestehenden Eigenschaften wie Schlackenresistenz oder Temperaturwechselbeständigkeit zu beeinträchtigen.

Der vorliegende Feuerbeton weist eine Grünfestigkeit im Bereich hochfester Betone (um 120 N/mm^2) auf. Die Kaltdruckfestigkeiten bei Temperaturbeanspruchungen um 800°C sind geringer. Aufgrund des Einsatzbereiches des Feuerbetons in Vergütungsöfen der Stahlindustrie stellt jedoch vor allem der Temperaturbereich von 600°C bis 1000°C einen großen Anspruch an die Betonfestigkeiten.

Im Allgemeinen führt die Analyse der Kornverteilungen, der Porosität und der Kaltdruck- und Kaltbiegefestigkeiten zu folgenden möglichen Optimierungsansätzen:

- Optimierung der Packungsdichte und der Kornverteilung unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften des Betons
- Adaptierungen im Bindersystem z.B. durch Reduzierung des Zementanteils bzw. Verwendung von Phosphatbindern an Stelle des Zements.

Der erste Ansatz, das Optimieren der Packungsdichte stellt in der ultrahochfesten Betontechnologie einen grundlegenden Ansatz zur Erhöhung der Festigkeiten dar und ist Grundlage einiger Forschungsarbeiten. Bei Feuerbetonen kann die Grünfestigkeit durch Optimieren der Packungsdichte im Grünzustand sicherlich gesteigert werden. Jedoch kommt es, wie die durchgeführten porosimetrischen Untersuchungen gezeigt haben, bei einer Beanspruchung hoher Temperaturen aufgrund chemischer und physikalischer Reaktionen (Schmelz- und Sintervorgänge) zu merklichen

Veränderungen der Gefügestruktur und der Porenverteilungen. In der Folge führt eine ursprünglich optimale Packungsdichte im Grünzustand nach dem Erhitzen nicht automatisch zu einer ebenfalls optimalen Packungsdichte.

Um die Packungsdichte des vorliegenden Feuerbetons zu optimieren, kann im nächsten Schritt eine Untersuchung der Korngrenzen zwischen den Bindemittel- und Feinstkornanteilen (Mikrosilika, Tonerde) und den feuerfesten Zuschlagsstoffen angesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit, die Packungsdichte zu erhöhen, könnte auch durch Optimieren der Kornform erreicht werden. Die Schamotte (Clayrac) besteht aus sehr kantigen Körnungen, durch die eine optimale Packungsdichte erschwert wird.

Der zweite Ansatz setzt bei Veränderungen im Bindersystem an. Die Anforderungen an den vorliegenden Feuerbeton sind für den Temperatureinsatzbereich von 600°C bis 1000°C am höchsten, wobei durch Festigkeitsprüfungen genau in diesem Bereich ein starker Festigkeitsabfall festgestellt wurde. Das ist vor allem auf eine Zerstörung der hydraulischen Bindung zurückzuführen. Um die Festigkeiten in diesem Bereich zu steigern, könnten im nächsten Schritt Adaptierungen des Bindersystems untersucht werden. Als eine Möglichkeit kann das Reduzieren des Zementanteils angeführt werden und/oder der Einsatz von Phosphatbindern in Erwägung gezogen werden. Phosphatbinder könnten möglicherweise das „Festigkeitsloch“ bis zum Einsetzen der keramischen Bindung reduzieren. Dazu müssten im nächsten Schritt die Phasenveränderungen der Bindemittelanteile in Hinblick auf Dehydratisierung, Kristallisation und Phasenumwandlungen untersucht werden.

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Vergleich der chemischen Zusammensetzungen in Prozent (20 S. 238)	16
Tabelle 2.2:	Klinkerphasen, ihre Masseanteile in Prozent und ihre Eigenschaften (20 S. 239).....	17
Tabelle 2.3:	Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischen und kalzitischen Betonen (37 S. 35).....	30
Tabelle 2.4:	Unterscheidung von Zementsteinporen nach kapillarem Saugvermögen (26 S. 33).....	36
Tabelle 3.1:	Klassifizierung der Betone nach dem CaO-Gehalt	44
Tabelle 3.2:	Längen- und Raumänderung von Silika unter Temperaturbeanspruchung (55 S. 171). 47	
Tabelle 3.3:	Eigenschaften von Schamottesteinen (47 S. 44)	48
Tabelle 3.4:	Umwandlung der Mineralien der Silimanitgruppe beim Erhitzen in Mullit (55 S. 596). 48	
Tabelle 3.5:	Bestimmte Eigenschaften von Mullit und Korund (54 S. 562)	50
Tabelle 3.6:	Veränderungen der Feuerbetoneigenschaften durch Beigabe von Stahlfasern (47 S. 171)	53
Tabelle 3.7:	Vorschläge für Mischer, Mischzeiten und Verarbeitungstechniken (47 S. 151)	55
Tabelle 3.8:	Gasdurchlässigkeitswerte für feuerfeste Werkstoffe (47 S. 284)	64
Tabelle 4.1:	Versatz des Referenzbetons.....	69
Tabelle 4.2:	Physikalische Angaben des Clayrac 45 N.....	70
Tabelle 4.3:	Chemische Zusammensetzung von Clayrac 45 N lt. Datenblatt (64)	71
Tabelle 4.4:	Physikalische Daten des Edelkorund „ALODUR“ WRG.....	72
Tabelle 4.5:	Typische chemische Analyse von ALODUR WRG (Fraktion 0 - 0,2 mm) lt. Herstellerdatenblatt (63)	73
Tabelle 4.6:	Physikalische Daten von Silubit FB 10	74
Tabelle 4.7:	Chemischen Kennwerte von Silubit FB 10 lt. Datenblatt	74
Tabelle 4.8:	Physikalische Daten von Natriumzitat	76
Tabelle 4.9:	Physikalische Daten von SECAR 71.....	77
Tabelle 4.10:	Hauptbestandteile von SECAR 71 lt. Herstellerangaben (71) (63).....	77
Tabelle 5.1:	Übersicht über die hergestellten Proben und dem Prüfumfang für die Untersuchung des Referenzbetons.....	84
Tabelle 5.2:	Aufstellung der Druckfestigkeiten (Mittelwert) des Referenzbetons in Abhängigkeit der Brenntemperatur	87
Tabelle 5.3:	Aufstellung der Biegezugfestigkeiten (Mittelwert) des Referenzbetons in Abhängigkeit der Brenntemperatur	88
Tabelle 5.4:	Aufstellung der Gesamtporosität des Referenzbetons in Abhängigkeit der Brenntemperatur	91

8 Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1:	Aufbau der Arbeit	9
Bild 2.1:	Betondruckfestigkeiten in Abhängigkeit des W/Z-Wertes im Vergleich (8 S. 2)	11
Bild 2.2:	Wesentliche Entwicklungen in der Betontechnologie im 20. Jahrhundert (2 S. 99)	12
Bild 2.3:	Die Scherbrooke Bridge in Kanada aus Ultrahochleistungsbeton (3)	13
Bild 2.4:	Erste Bogenbrücke aus UHPC in Kärnten/Österreich im Bau (13)	13
Bild 2.5:	Erste Bogenbrücke aus UHPC in Kärnten/Österreich nach Fertigstellung (14)	13
Bild 2.6:	Seonyu Fussgängerbrücke aus UHPC in Seoul (3)	14
Bild 2.7:	Maximal ausführbare Gebäudehöhe nach Betonsorte (1 S. 298)	14
Bild 2.8:	Ausgangsstoffe des Betons (4)	16
Bild 2.9:	Gesamtwasserzugabe von Beton (8)	18
Bild 2.10:	Darstellung eines Eirich-Mischers (28)	22
Bild 2.11:	28-Tage Druckfestigkeit von Zementstein und Normalbeton in Abhängigkeit vom W/Z-Wert und der Zementfestigkeitsklasse (32)	24
Bild 2.12:	Einfluss des W/Z-Wertes auf Betoneigenschaften (32)	25
Bild 2.13:	Einflussgrößen der Feinstoffe auf die Kornpackung und den volumetrischen Wasser-Feststoff-Wert (1)	27
Bild 2.14:	Gewichtsverlust von Normalbeton mit Portlandzement	29
Bild 2.15:	Bezogene Hochtemperaturfestigkeit von HPC im Vergleich zu Normalbeton (23)	31
Bild 2.16:	Druckfestigkeitsverlauf von UHPC bei Brandversuchen (37 S. 63)	32
Bild 2.17:	Thermische Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur (37)	33
Bild 2.18:	Schematische Darstellung der Entstehung von Abplatzungen	33
Bild 2.19:	Dampfdruck-Kurve (38)	34
Bild 2.20:	Vergleich von Normalbeton und Hochleistungsbeton (37)	34
Bild 2.21:	Darstellung der Poren in einem porösen Baustoff (26 S. 33)	35
Bild 2.22:	Verteilung der Porosität in Abhängigkeit der Temperatur (8 S. 48)	37
Bild 2.23:	Darstellung der Hohlraumfüllung in einem Tetraeder (22)	38
Bild 3.1:	Herdwagenofen in der Wärmebehandlung der Stahlindustrie (49)	40
Bild 3.2:	(links) Betonierter Herdwagen (49)	41
Bild 3.3:	(rechts) Konstruktionszeichnung eines Herdwagens (49)	41
Bild 3.4:	Klassifizierung ungeformter feuerfester Erzeugnisse (52 S. 524); Referenzbeton rot eingekreist	42
Bild 3.5:	Grundstoffpyramide feuerfester Werkstoffe (47 S. 2)	45

Bild 3.6:	Hochtemperaturverhalten von Werkstoffen im $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -System (54 S. 560)	46
Bild 3.7:	Kaltbiegefestigkeit und Kaltdruckfestigkeit in Abhängigkeit der Anmachwassermenge (58 S. 24)	52
Bild 3.8:	Typische Trocknungskurve für Aluminium-Schmelzöfen (59 S. 325)	57
Bild 3.9:	Kaltdruckfestigkeit eines Schamottebetons mit 20% Zementanteil bestehend aus drei unterschiedlichen Calciumaluminatzementen (40, 50 sowie 80% Al_2O_3 -Anteil) (47 S. 157)	58
Bild 3.10:	Kaltbiegefestigkeit eines Schamottebetons mit 20% Zementanteil bestehend aus drei unterschiedlichen Calciumaluminatzementen (40, 50 sowie 80% Al_2O_3 -Anteil) (47 S. 158)	59
Bild 3.11:	Kaltdruckfestigkeit bei unterschiedlichen Zuschlagsstoffen und Zementtypen (47 S. 160)	60
Bild 3.12:	Beispiel der Heißbiegefestigkeit von feuerfesten Korundwerkstoffen (47 S. 289)	61
Bild 3.13:	Schematische Darstellung von Spannungs-Verformungsdiagrammen (47)	62
Bild 3.14:	Druckspannungsverformungskurven eines Schamottesteines in Abhängigkeit von der Temperatur (47)	63
Bild 3.15:	Einfluss der Gesamtporosität auf die Eigenschaften feuerfester Werkstoffe (47 S. 307)	65
Bild 3.16:	Die verschiedenen Arten der Porositäten und ihre Bestimmungsmethoden (47 S. 307)	66
Bild 3.17:	Porengrößenverteilung in dichten Feuerbetonen (47 S. 305)	67
Bild 4.1:	Ergebnis der Porenverteilung Clayrac 45 N bestimmt mittels Quecksilberporosimetrie.	70
Bild 4.2:	Kornverteilungen der eingesetzten Schamottekörnungen bestimmt mittels Trockensiebung und Sedimentationsanalysen	72
Bild 4.3:	Kornverteilung von „ALODUR“ 0 - 0,1 mm bestimmt mittels Sedimentationsanalysen ..	73
Bild 4.4:	Kornverteilung von Silubit FB 10 bestimmt mittels Sedimentationsanalyse und Ultraschalldispersion	75
Bild 4.5:	Kornverteilungen SECAR 71 (Siebung und Sedimentationsanalysen in Isopropanol)	78
Bild 4.6:	Zusammenstellung der Kornverteilungen der einzelnen Rohstoffe	79
Bild 5.1:	Aufheizkurve und Haltezeiten der Probekörper lt. Hersteller	83
Bild 5.2:	Schalungen mit 4 x 4 x 16 cm	85
Bild 5.3:	Fertige Probekörper mit 4 x 4 x 16 cm	85
Bild 5.4:	Maschine Fa. TONI Technik Modell 2040 zum Messen der Druckfestigkeit (4)	85
Bild 5.5:	Biegezugfestigkeitsprüfung	86
Bild 5.6:	Momentaufnahme einer Biegezugfestigkeitsprüfung	86

Bild 5.7:	Darstellung der gemittelten Kaltdruckfestigkeiten in Abhängigkeit der Brenntemperatur	87
Bild 5.8:	Auswertung der Kaltdruckfestigkeiten der einzelnen Probenserien.....	88
Bild 5.9:	Darstellung der gemittelten Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Brenntemperatur..	89
Bild 5.10:	Auswertung der Biegezugfestigkeiten der einzelnen Probenserien.....	89
Bild 5.11:	Darstellung der Gesamtporosität als Verlauf in Abhängigkeit der Brenntemperatur.....	92
Bild 5.12:	Die Verteilung des Porendurchmessers (kumulativ) bei verschiedenen Brenntemperaturen.....	93
Bild 5.13:	Relative Anteile der Porendurchmesser in den Referenzproben bei verschiedenen Brenntemperaturen.....	93
Bild 5.14:	Entwicklung des Anteils an Poren mit einem Durchmesser zwischen 3 und 70 nm in Abhängigkeit der Brenntemperatur	94
Bild 5.15:	Entwicklung des Anteils an Poren mit einem Durchmesser zwischen 0,7 bis 70 μm in Abhängigkeit der Brenntemperatur	94
Bild 5.16:	Kumulative Anteile des Porenvolumens in der Probe.....	95
Bild 5.17:	Anteile des Porenvolumens in der Probe	96

9 Formelverzeichnis

Formel 2-1: Wasser-Zement-Wert (26).....	24
Formel 2-2: Wasser-Bindemittel-Wert (26)	26
Formel 2-3: Volumenbezogener Wasser-Feststoff-Wert (34).....	27
Formel 2-4: Massebezogener Wasser-Feststoff-Wert (34).....	27
Formel 2-5: Berechnung der Packungsdichte (22)	37
Formel 5-1: Formel zur Berechnung der Druckfestigkeit (74 S. 45).....	85
Formel 5-2: Formel zur Berechnung der Biegezugfestigkeit (74 S. 47).....	86

10 Literaturverzeichnis

1. **Schmidt, M. und Fehling, E.** *UHPC - Heft 7*. Kassel : Kassel university press, 2007. ISBN 978-3-89958-347-2.
2. **Schmidt, M., Fehling, E. und Geisenhanslüke, C.** *UHPC - Heft 3*. Kassel : Kassel university press, 2004. ISBN 3-89958-086-9.
3. **Lafarge Gruppe.** Ductal. [Online] [Zitat vom: 16. Juli 2013.] http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/2_1-Structural_elements.
4. **Kurka, Gerald.** Diplomarbeit. *Einfluss des Vakuummischprozesses auf die Herstellung von ultrahochfesten Betonen mit verschiedenen Faserarten*. Wien : TU Wien, 2012.
5. **Schmidt, M. und Fehling, E.** *UHPC - Heft 2*. Kassel : Kassel university press, 2003. ISBN 3-89958-518-6.
6. **Schmidt, M und Fehling, E.** *UHPC - Heft 1*. Kassel : Kassel university press, 2005. ISBN 3-89958-108-3.
7. **Horvath, Johannes.** Diplomarbeit. *Entwicklung von hochfestem Blähton*. Wien : TU Wien, 1998.
8. **Safranek, Karin.** Diplomarbeit. *Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone*. Wien : TU Wien, 2007.
9. **Röhling, Stefan, Eifert, Helmut und Jablinski, Manfred.** *Betonbau*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2013. ISBN 978-3-8167-8646-7.
10. **Berger, Matthias.** Diplomarbeit. *Einfluss des Vakuummischprozess auf ausgewählte Eigenschaften ultrahochfester Betone*. Wien : TU Wien, 2008.
11. **Betonmarketing Österreich.** Beton. [Online] [Zitat vom: 17. Juli 2013.] http://www.betonmarketing.at/modern/technisch/ultrahochfester_beton_wild_bruecke_in_kaernten_ist_die_laengste_strassenbruecke_der_welt_mit_uhpc.
12. **Sparowitz, Lutz; Freytag, Bernhard .** Ultra-hochfester Beton. [Online] 11. August 2011. [Zitat vom: 17. Juli 2013.] [http://austria-forum.org/af/Wissenssammlungen/Bibliothek/TUGraz_200_Jahre/Jahre_2001_bis_2011/Bauingenieurwissenschaften/Ultra-hochfester_Faserbeton_\(UHPC\)](http://austria-forum.org/af/Wissenssammlungen/Bibliothek/TUGraz_200_Jahre/Jahre_2001_bis_2011/Bauingenieurwissenschaften/Ultra-hochfester_Faserbeton_(UHPC)) .
13. **Kleine Zeitung.** [Online] 19. April 2010. [Zitat vom: 13. September 2013.] <http://www.kleinezeitung.at/kaernten/voelkermarkt/2337164/bogen-fuer-wild-bruecke-gespannt.story>.

- 14. gogol medien.** Mein Bezirk. [Online] [Zitat vom: 13. September 2013.]
<http://www.meinbezirk.at/bleiburg/wirtschaft/nach-zwei-jahren-bauzeit-wird-zum-firmenjubilaeum-am-1-oktober-die-wild-bruecke-bei-voelkermarkt-eroeffnet-sie-ist-auch-die-neue-zufahrt-zum-unternehmen-m2514774,306405.html>.
- 15. Burj Khalifa.** [Online] [Zitat vom: 17. Juli 2013.]
<http://www.burjkhalifa.ae/en/TheTower/FactsFigures.aspx>.
- 16. Sueddeutsche.** [Online] 30. April 2013. [Zitat vom: 16. Juli 2013.]
<http://www.sueddeutsche.de/wissen/beton-mit-zukunft-neue-rezepte-fuer-das-magische-pulver-1.1661491>.
- 17. Rummelin, Andreas Timo.** Diplomarbeit. *Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen*. Metzingen : Fachhochschule Stuttgart, 2005.
- 18. Arafa, M.; Shihada, S.; Karmout, M.** Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete Produced in the Gaza Strip . [Online] 2010. [Zitat vom: 19. Juli 2013.]
<http://scialert.net/fulltext/?doi=ajmskr.2010.1.12&org=12>.
- 19. Becic, Admir.** Diplomarbeit. *Der Einfluss der Kornform des Zuschlages auf das Abplatzverhalten von Beton unter Brandbeanspruchung*. Wien : TU Wien, 2010.
- 20. Schneider, Ulrich und Knoblauch, Harald.** Bauchemie. Köln : Wolters Kluwer Deutschland GmbH, 2013. ISBN 978-3-8041-5250-2.
- 21. Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. [Online] 5. Juli 2013. [Zitat vom: 22. Juli 2013.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Zement>.
- 22. Kirnbauer, Johannes.** Dissertation. *Der Vakuummischprozess zur Herstellung von UHPC* . Wien : TU Wien, 2013.
- 23. Schödl, Jennifer.** Diplomarbeit. *Wärmepermeabilität von ultrahochfesten Betonen*. Wien : TU Wien, 2011.
- 24. Schneider, Ulrich und Horvath, Johannes.** Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen. *Schriftenreihe des Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz*. Wien : TU Wien Institut 206, 2006. Bd. Heft 8.
- 25. Pauser, A. [Buchverf.].** Abplatzverhalten von Tunnelinnenschalen unter hohen Temperaturen. *Massivbrücken*. s.l. : Beton Zement.
- 26. Stangl, Albert.** Diplomarbeit. *Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdichte zur Herstellung von UHPC*. Wien : TU Wien, 2011.

27. **Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [Online] 28. März 2013. [Zitat vom: 5. August 2013.] [http://de.wikipedia.org/wiki/Mischen_\(Verfahrenstechnik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Mischen_(Verfahrenstechnik)).
28. **Verein Deutscher Ingenieure VDI.** Das hallesche Ingenieurmagazin. [Online] 2013. [Zitat vom: 17. September 2013.] http://ingpost.de/archiv/archiv_2010/03_2010/vdi14_fachkolloquium.html.
29. **Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & CoKG.** [Online] Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & CoKG, 2012. [Zitat vom: 2. August 2013.]
30. **Rossbacher, Ludwig.** Diplomarbeit. *Einfluss unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Eigenschaften vakuumgemischter ultrahochfester Betone*. Wien : TU Wien, 2010.
31. **Tankó, László.** Diplomarbeit. *Einfluss des Vakuummischprozesses auf die Standardprüfergebnisse für Anforderungen gemäß ÖNORM 4710-1*. Wien : TU Wien, 2008.
32. **Lins, Michael.** Diplomarbeit. *Verhalten von ultrahochfesten Betonen unter Brandbeanspruchung*. Wien : TU Wien, 2004.
33. **Vereinigung der österreichischen Zementindustrie.** [Online] Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H., 2011. [Zitat vom: 19. August 2013.] <http://www.zement.at/>.
34. **Schmidt, Michael und Geisenhanslüke, Carsten.** Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra-Hochleistungs- und Selbstverdichtendem Beton. [Buchverf.] M. Schmidt und E. Fehling. *UHPC - 10 Jahre Forschung und Entwicklung*. Kassel : Kassel University Press, 2005.
35. **Wikipedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [Online] 21. Juli 2013. [Zitat vom: 20. August 2013.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Elastizit%C3%A4tsmodul>.
36. **Schneider, Ulrich, Horvath, Johannes und Dehn, Frank.** Faserbewehrte ultrahochfeste Betone. [Buchverf.] Gert König, K. Holschemacher und Frank Dehn. *Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft - Faserbeton*. Leipzig : Bauwerk Verlag, 2002.
37. **Horvath, Johannes.** Dissertation. *Beiträge zum Brandverhalten von Hochleistungsbetonen*. Wien : TU Wien, 2003.
38. **Wolffhardt, Johannes.** Diplomarbeit. *Untersuchung der Druckfestigkeit und des E-Moduls von Normalbeton, HPC und UHPC unter Temperaturbelastung*. Wien : TU Wien, 2011.
39. **Schneider, Ulrich, et al.** Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHPC). *Beton- und Stahlbetonbau* 96 (2001). Nr 7.
40. **Schneider, Ulrich und Horvath, Johannes.** *Temperaturverhalten von hochfesten Betonen für den Tunnelbau*. TU Wien : s.n.

41. **Schneider, Ulrich, Diederich, Ulrich und Horvath, Johannes.** *Verhalten von ultrahochfesten Betonen unter Brandbeanspruchung.* Wien : Beton und Stahlbetonbau, 2003.
42. **Schneider, Ulrich und Horvath, Johannes.** Temperaturverhalten von UHPC. [Buchverf.] Gert König, Klaus Holschemacher und Frank Dehn. *Ultrahochfester Beton.* s.l. : Bauwerk.
43. **Schneider, Ulrich, Horvath, Johannes und Dehn, Frank.** Abplatzverhalten von ultrahochfesten Beton (UHPC) unter Brandbeanspruchung. Wien : TU Wien.
44. **Schneider, Ulrich und Horvath, Johannes.** *Behaviour of Ordinary Concrete at High Temperatures.* Wien : TU Wien - Rilem Committee HTC, 2003.
45. **Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [Online] 24. August 2013. [Zitat vom: 11. September 2013.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Porosit%C3%A4t>.
46. **Geisenhanslüke, Carsten.** Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. [Buchverf.] Michael Schmidt und Ekkehard Fehling. *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 13.* Heft 13. Kassel : kassel university press, 2008.
47. **Routschka, Gerald und Wuthnow, Hartmut.** Feuerfeste Werkstoffe. *Aufbau - Eigenschaften - Prüfung.* Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2011. 5. ISBN 978-3-8027-3161-7.
48. **Beneke, Franz, Nacke, Bernard und Pfeifer, Herbert.** *Handbook of Thermoprocessing Technologies.* Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2012. ISBN 978-3-8027-2966-9.
49. **Rath AG.** [Online] Rath AG. [Zitat vom: 26. September 2013.] <http://www.rath-group.com/>.
50. **Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie . [Online] [Zitat vom: 27. September 2013.] [http://de.wikipedia.org/wiki/Verg%C3%BCten_\(Metallbearbeitung\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Verg%C3%BCten_(Metallbearbeitung)).
51. **DIN EN ISO 1927-1.** *Ungeformte (monolithische) feuerfeste Erzeugnisse- Teil 1.* Brüssel : Europäisches Komitee für Normung, 2013.
52. **Springer, Michael, Rath, Georg und Wimmer, Heinz.** Refractory Ceramic Materials. [Buchverf.] Frank Beneke, Bernard Nacke und Herbert Pfeifer. *Handbook of Thermoprocessing Technologies.* Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2012.
53. **Salmang, H. und Scholze, H.** *Keramik.* Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2007.
54. **Kollenberg, Wolfgang.** *Technische Keramik - Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik.* Essen : Vulkan Verlag, 2009. ISBN 978-3-8027-2927-7.
55. **Harders, Friedrich und Kienow, Sigismund.** *Feuerfestkunde.* Berlin, Göttingen, Heidelberg : Springer-Verlag, 1960.

- 56. HeidelbergCement.** [Online] [Zitat vom: 23. September 2013.] http://beton-technische-daten.de/1/1_8.htm.
- 57. Kerneos. Secar Plenium** - Essence of Castable. Neuilly-sur-Seine : s.n., 2013.
- 58. Dr.C.Otto Feuerfest GmbH.** *Das blaue Buch - Fakten und Daten für Planung und Produktion.* Bochum : Dr.C.Otto Feuerfest GmbH, 2002.
- 59. Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.** Feuerfestbau: *Werkstoffe - Konstruktion - Ausführung.* Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2003. 3.
- 60. Petzold, Armin und Manfred, Röhrs.** Beton für hohe Temperaturen. Wisconsin : Beton-Verlag, 1965.
- 61. Beuth Verlag GmbH.** [Online] Beuth Verlag GmbH. [Zitat vom: 27. August 2013.] <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-1893/105913621>.
- 62. Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [Online] 27. Juli 2013. [Zitat vom: 17. September 2013.] [http://de.wikipedia.org/wiki/Thermische_Spannung_\(Mechanik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Thermische_Spannung_(Mechanik)).
- 63. Lebeda, Christian.** *Feuerfeste UHPC für den Einsatz in der Energie- und Umwelttechnik sowie Aluminiumindustrie.* Wien : TU Wien, Stand Juli 2013.
- 64. AGS Mineraux.** [Online] 11. Juni 2012. [Zitat vom: 6. September 2013.] [http://www.ags-mineraux.com/Scopi/Group/AGS/ags-mineraux.nsf/pagesref/SLMM-8BHM3K/\\$File/Chamottes%20Réfractaires.pdf](http://www.ags-mineraux.com/Scopi/Group/AGS/ags-mineraux.nsf/pagesref/SLMM-8BHM3K/$File/Chamottes%20Réfractaires.pdf).
- 65. Treibacher Schleifmittel.** [Online] Treibacher Schleifmittel GmbH. [Zitat vom: 5. September 2013.] <http://www.treibacher-schleifm.com/refractories.html>.
- 66. Zschimmer & Schwarz GmbH & Co KG.** [Online] 14. August 2013. [Zitat vom: 5. September 2013.] <http://www.zschimmer-schwarz.com/1-10.Impressum.html>.
- 67. GESTIS Stoffdatenbank.** [Online] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). [Zitat vom: 5. September 2013.] [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0).
- 68. Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [Online] 22. März 2013. [Zitat vom: 5. September 2013.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Natriumcitrat>.
- 69. Kerneos. Secar.** [Online] [Zitat vom: 6. September 2013.] <http://www.secar.net/SECAR-R-71,14#>.
- 70. Kerneos SA. SECAR.** [Online] [Zitat vom: 6. September 2013.] <http://www.secar.net/documents/SDS-SecarRange-DE.pdf>.

- 71. Kerneos Inc. Product Data Sheet. Secar 71.** Priority Chesapeake, VA 23324 : s.n., 24. August 2006.
Reference PDS-US-S71-8/06.
- 72. Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [Online] 30. März 2013. [Zitat vom: 13. September 2013.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Mullit>.
- 73. e.V., DIN Deutsches Institut für Normung.** Feuerfeste Werkstoffe und Feuerfestbau - DIN Normen. [Buchverf.] Gerald Routschka. Berlin, Essen : Vulkan Verlag, Beuth Verlag, 2000.
- 74. ON Österreichisches Normungsinstitut.** *Zusammenstellung der Prüfverfahren Beton gemäß ÖNORM B 3303 "Betonprüfung"*. Wien : s.n., 2002.
- 75. Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [Online] 3. April 2013. [Zitat vom: 11. Juli 2013.] http://de.wikipedia.org/wiki/Ultrahochfester_Beton.
- 76. Grübl, Peter, Weigler, Helmut und Karl, Sighart.** *Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften*. Berlin : Ernst&Sohn, 2001. ISBN 3-433-01340-3.
- 77. Teggan, Michael.** *Diplomarbeit - Einfluss des Bindemittels auf die Brandbeständigkeit des Betons*. Wien : TU Wien, 2007.
- 78. Wikimedia Foundation Inc.** Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [Online] 24. April 2013. [Zitat vom: 8. August 2013] <http://de.wikipedia.org/wiki/Schamotte>.
- 79. König, Holschemacher und Dehn.** *Faserbeton*. Berlin : Bauwerk Verlag GmbH, 2002. ISBN 3-89932-019-0.
- 80. Europäisches Normungsinstitut. EN 1402-5 .** *Ungeformte feuerfeste Erzeugnisse - Teil 5: Herstellung und Behandlung*. Brüssel : s.n., 2002-08.
- 81. Didier-Werke AG.** *Didier Feuerfesttechnik - Feuerfeste Werkstoffe und ihre Merkmale*. Wiesbaden : Druckhaus Darmstadt GmbH, 1981.
- 82. DIN EN 196-1:2005-05** *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*. s.l. : Deutsches Institut für Normung, 2005.