

# TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

## DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

Beitrag zur Entwicklung einer Messanordnung zur Ermittlung des  
Kapillarporendruckes von Normalbeton unter Brandbeanspruchung

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

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr. h.c. Ulrich SCHNEIDER

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

E206

Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

Von

Gerhard MATZINGER

0125234

Kaiserbrunnstraße 88, 3021 Pressbaum

Wien, im Juni 2007

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit wurde durch das Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz der Technischen Universität Wien und dessen Leiter O.Univ.Prof. Dipl.-Ing.Dr.Dr.h.c. Ulrich Schneider ermöglicht.

Besonderen Dank möchte ich den Institutsmitarbeitern Heinrich Bruckner, Shangwei Chen, Johannes Kirnbauer und Christian Baierl, sowie Matthias Zeiml vom Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen der TU Wien für ihre Unterstützung, Hilfe und kollegiale Zusammenarbeit aussprechen.

Weiters bedanke ich mich bei meinem Studienkollegen Christoph Kosch, der mir während der anstrengenden Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung immer zur Seite stand und eine enorme Hilfe war.

Last not least möchte ich mich herzlich bei all jenen Menschen bedanken, ohne die mein Studium nicht möglich gewesen wäre.

Allen voran bei meinen Eltern für ihre große Unterstützung und Förderung, sowie bei meinen Geschwistern und meinen Freunden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Beton</b>	<b>3</b>
2.1.1	Betonsorten	3
2.1.2	Porenarten und Porengrößenverteilung	6
2.1.3	Wasserbindemittelwert und Erhärtungsprozess	8
<b>2.2</b>	<b>Zement</b>	<b>10</b>
2.2.1	Allgemeines	10
2.2.2	Erzeugung	11
2.2.3	Hydratation	13
2.2.4	Bezeichnung	15
<b>2.3</b>	<b>Gesteinskörnungen für Beton</b>	<b>16</b>
2.3.1	Allgemeines und Einteilung	16
2.3.2	Kornzusammensetzung	18
<b>2.4</b>	<b>Zusatzmittel</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>Faserbeton</b>	<b>22</b>
2.5.1	Allgemeines	22
2.5.2	Polypropylenfasern (Kunststofffasern)	24
<b>2.6</b>	<b>Verhalten von Normalbeton bei Brand</b>	<b>28</b>
2.6.1	Verhalten von Normalbeton bei Temperaturen von weniger als 300°C	28
2.6.2	Verhalten von Normalbeton bei Hochtemperaturbelastung	29
2.6.2.1	Zuschlagumwandlungen unter Temperaturbelastung	29
2.6.2.2	Druckfestigkeit, Verformung und E-Modul	30
2.6.3	Temperaturverteilung in einseitig wärmebeanspruchten Betonbauteilem	33
2.6.4	Abplatzungen zufolge Brandbelastung	34
2.6.4.1	Allgemeines	34
2.6.4.2	Zuschlagstoff Abplatzungen (Aggregate Spalling)	35
2.6.4.3	Abfallen von Betonschichten (Sloughing off)	36
2.6.4.4	Soft Spalling bei Spritzbeton	37
2.6.4.5	Explosionsartige Abplatzungen (Explosive Spalling)	37
2.6.5	Thermohydraulische Prozesse - Porendruck	39
<b>2.7</b>	<b>Temperatur-Zeitkurvenkurven</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>Aktuelle Untersuchungen zum Thema Kapillarporendruck von Beton unter Brandbelastung – Stand der Technik</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Einführung</b>	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>Untersuchungen durch das NIST (National Institute of Standards and Technology, USA)</b>	<b>47</b>
3.2.1	Porendruckuntersuchungen an Normal- und hochfestem Beton (2002)	47
3.2.2	Porendruckuntersuchungen an Zementmörtel (1997)	49

---

<b>3.3</b>	<b>Untersuchungen durch das <i>CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment, Fra)</i> 1999-2002</b>	<b>52</b>
<b>3.4</b>	<b>Forschungsauftrag des <i>Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)</i>, Österreich 2003</b>	<b>55</b>
<b>3.5</b>	<b>Gegenüberstellung der Messergebnisse des <i>NIST, CSTB</i> und des <i>BMVIT</i></b>	<b>58</b>
<b>3.6</b>	<b>Weitere Untersuchungen</b>	<b>59</b>
<b>4</b>	<b><i>Versuchsplanung und Durchführung</i></b>	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>Versuchsplanung</b>	<b>60</b>
<b>4.2</b>	<b>Betonrezepturen</b>	<b>62</b>
4.2.1	Allgemeines	62
4.2.2	Mischung RK 01* (1,5 kg/m <sup>3</sup> PP-Fasern)	64
4.2.3	Mischung RK 01 (1,5 kg/m <sup>3</sup> PP-Fasern)	65
4.2.4	Mischung RK 02 (0 kg/m <sup>3</sup> PP-Fasern)	67
<b>4.3</b>	<b>Herstellen der Platten und Probekörper</b>	<b>68</b>
4.3.1	Mischen des Betons	68
4.3.2	Betonieren der Versuchsplatten	71
4.3.3	Betonieren der Prüfkörper	73
4.3.4	Lagerung	73
<b>4.4</b>	<b>Betonprüfung</b>	<b>74</b>
4.4.1	Frischbetonprüfung	74
4.4.2	Festbetonprüfung	76
4.4.3	Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen	78
4.4.3.1	Ergebnisse für Luftporenanteil und Ausbreitmaß	78
4.4.3.2	Ergebnisse Wassergehalt	79
4.4.3.3	Ergebnisse Druckfestigkeit	80
<b>4.5</b>	<b>Druckgeberflüssigkeit</b>	<b>81</b>
<b>4.6</b>	<b>Brandofen</b>	<b>88</b>
<b>4.7</b>	<b>Brenner</b>	<b>89</b>
<b>4.8</b>	<b>Messtechnik Druck</b>	<b>90</b>
4.8.1	Rohrfedermanometer	90
4.8.2	Drucksensoren	90
<b>4.9</b>	<b>Messtechnik Temperatur</b>	<b>91</b>
<b>5</b>	<b><i>Versuche zur Entwicklung eines Messaufbaues und Ergebnisse</i></b>	<b>93</b>
<b>5.1</b>	<b>Vorversuche 00</b>	<b>93</b>
<b>5.2</b>	<b>Versuche 1</b>	<b>95</b>
5.2.1	Brandversuch 1	100
5.2.2	Brandversuch 2	103
<b>5.3</b>	<b>Versuch 2</b>	<b>105</b>
<b>5.4</b>	<b>Versuch 3</b>	<b>108</b>
<b>5.5</b>	<b>Versuch 4</b>	<b>114</b>
<b>5.6</b>	<b>Versuch 5</b>	<b>118</b>

<b>6</b>	<b><i>Zusammenfassung</i></b>	<b>125</b>
<b>7</b>	<b><i>Ausblick</i></b>	<b>126</b>
7.1	Einleitung	126
7.2	Empfehlungen für weiterführende Forschungsarbeiten	126
<b>8</b>	<b><i>Summary</i></b>	<b>129</b>
<b>9</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b>	<b>130</b>
<b>10</b>	<b><i>Abbildungsverzeichnis</i></b>	<b>135</b>
<b>11</b>	<b><i>Tabellenverzeichnis</i></b>	<b>140</b>
<b>12</b>	<b><i>Anhang – Druckversuche</i></b>	<b>142</b>
12.1	Vorversuche RK 01*	142
12.2	Probewürfel RK 02	144
12.3	Probewürfel RK 01	147
12.4	Restfestigkeitsuntersuchung nach Brandversuch	149

# 1 Einleitung

Um das Verhalten von Beton und Stahlbeton unter Brandbeanspruchung besser verstehen und durch Rechenmodelle vorhersagen zu können ist die Kenntnis der darin auftretenden Spannungen und Vorgänge von großer Wichtigkeit. Diese Vorgänge können im schlimmsten Fall bei Nichtberücksichtigung bis zum Versagen riesiger Betonkonstruktionen führen, da beispielsweise eventuell durch Abplatzungen die notwendige Betonüberdeckung für die Bewehrung verringert wird und der Stahl die erforderlichen Zugkräfte nicht mehr aufnehmen kann.

Eine wesentliche Komponente ist, neben den in Beton durch die Erwärmung auftretenden Spannungen, der Kapillarporendruck, der durch Wasserdampfströmungen im Beton entsteht und bei Temperaturen von 150 °C bereits die Zugfestigkeit von Normalbeton überschreiten kann.

Bisher wurden auf diesem Forschungsgebiet sehr wenige Untersuchungen die realistische Ergebnisse erhalten haben durchgeführt. Die jeweiligen Messergebnisse variieren zudem auch sehr stark. Deshalb sind weitere Forschungen auf diesem Gebiet sinnvoll und notwendig um die Vorgänge in Beton während eines Brandes besser verstehen zu lernen und um daraus bestehende Rechen- und Simulationsmodelle verbessern zu können.

Inhalt der vorliegenden Arbeit ist es nun, einen Beitrag zur Entwicklung eines Messgerätes zur Ermittlung des Kapillarporendruckes von Normalbeton unter Brandbeanspruchung zu geben. Die dafür vorgesehenen Versuche gestalteten sich schwierig und wurden von vielen Rückschlägen begleitet, aber es konnten dennoch einige Erkenntnisse daraus gewonnen werden.

Die Durchführung der Versuche erfolgte im Labor des Institutes für Hochbau und Technologie – Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz der Technischen Universität Wien.

Das Kapitel 2 „Grundlagen“ beinhaltet die für diese Arbeit notwendigen Grundinformationen zum Baustoff Beton und dessen Inhaltsstoffen (die Unterkapitel Beton, Zement, Gesteinskörnungen für Beton, Zusatzmittel und Faserbeton), sowie Informationen zum Verhalten von Normalbeton bei Brand und Allgemeines zum Thema Temperatur-Zeitkurven. Die Grundlagen zu Betonprüfung und Nachbehandlung von Beton sind direkt in Kapitel 4 angeführt.

Kapitel 3 „Aktuelle Untersuchungen zum Thema Kapillarporendruck von Beton unter Brandbelastung – Stand der Technik“ beschäftigt sich mit bereits durchgeführten Versuchen und Ergebnissen zu diesem Thema vom *National Institute of Standards and Technology* aus den USA, dem *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* aus Frankreich und einem Forschungsauftrag des *Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie* aus Österreich. Weiters sind die Ergebnisse von anderen Versuchsreihen im Überblick angeführt.

Das folgende Kapitel 4 „Versuchsplanung und Durchführung“ beinhaltet erste Überlegungen zum Versuchsaufbau. Zudem wird das Herstellen und Prüfen der Platten und Probekörper beschrieben. Die für die Versuche verwendeten Vorrichtungen und Stoffe wie die Druckgeberflüssigkeit, Brandofen, Brenner und der Messaufbau für die Temperatur sind in diesem Kapitel ebenfalls berücksichtigt.

In Kapitel 5 „Versuche zur Entwicklung eines Messaufbaus“ werden 5 verschiedenartig aufgebaute Versuche beschrieben und mit den sich daraus ergebenden Erkenntnissen und Ergebnissen angeführt.

Kapitel 6 „Zusammenfassung“ ist eine kurze Zusammenfassung dieser Arbeit.

Das Kapitel 7 „Ausblick“ beschäftigt sich mit Empfehlungen die für zukünftige Versuche gegeben werden können.

Im Anhang (Kapitel 12) sind als Ergänzung die Prüfprotokolle und Grafiken der durchgeführten Druckproben angeführt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Beton

Beton ist ein Baustoff, erzeugt durch Mischen von Zement, grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser, mit oder ohne Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen. Er erhält seine Eigenschaften durch Hydratation des Zements (ÖNORM B 4710-1 S.15 [2]). Nach dem Mischen wird er im Allgemeinen durch Einbringen in Schalungen in die gewünschte Form gebracht, wo er dann erhärtet und einen künstlichen Stein bildet.

Je nachdem in welchem Erhärtungszustand sich der Beton befindet, kann man zwischen Frischbeton und Festbeton unterscheiden.

- **Frischbeton:** Solange der Beton verarbeitet werden kann wird er als Frischbeton bezeichnet.
- **Festbeton:** Der erhärtete Beton wird Festbeton genannt.

Nach der Rohdichte kann der Beton in drei Klassen eingeteilt werden (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Betoneinteilung nach Rohdichte (U. Schneider S. 3 [4])

	<b>Festbetonrohichte (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gesteinskörnungen (Beispiele)</b>
<b>Leichtbeton</b>	> 0,8 ≤ 2,0	Naturbims, Hüttenbims, Blähton, Blähschiefer
<b>Normalbeton</b>	> 2,0 ≤ 2,6	Sand, Kies, Kalkstein, Hochofenschlackensand, Hochofenstückschlacke
<b>Schwerbeton</b>	>2,6	Schwerspat, Eisenerz, Stahlsand, Stahlschrott

Zur Bestimmung des Porendruckes wurde Normalbeton untersucht.

#### 2.1.1 Betonsorten

Die Einteilung des Betons erfolgt primär nach der Druckfestigkeit. Treten zusätzliche Belastungen durch die Umwelt auf, sieht die ÖNORM B 4710-1 die Einteilung in Expositionsklassen vor. Weiters können auch Anforderungen für besondere Betonanwendungen gestellt sein.

Ein Beispiel für die korrekte Bezeichnung nach ÖNORM ist im Folgenden angeführt:



Der Vollständigkeit halber werden an dieser Stelle auch noch die Expositionsklassen und die Anforderungen für besondere Betonanwendungen angeführt. Diese sind aber an dieser Stelle von geringer Bedeutung, da keine besonderen Anforderungen an den Beton gestellt wurden und keine besonderen Umwelteinflüsse während der Laborversuche vorhanden waren.

### **Expositionsklassen (Umweltklassen)**

Darin werden die durch die Umgebung entstehenden chemischen und physikalischen Einwirkungen erfasst.

Die Bezeichnungen der Expositionsklassen ergibt sich aus:

- X0           Kein Angriffsrisiko

Bewehrungskorrosion verursacht durch:

- XC           Karbonatisierung
- XD           Chloride
- XS           Meerwasser
- XF           Frost und Frost-Tausalz
- XA           Chemischer Angriff
- XM           Verschleiß

### **Anforderungen für besondere Betonanwendungen**

Für besondere Betonanwendungen sieht die ÖNORM B 4710-1 folgende Klassen vor:

- Unterwasserbeton (UB1, UB2 )
- Pumpbeton (PB )
- Sichtbeton (SB )
- Selbstverdichtender Beton (SCC )
- Beton mit geringer Blutneigung (BL )
- Wärmeentwicklung bei der Erhärtung (W)
- Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeit (VV)
- Beton mit verzögerter Anfangserhärtung (VA)
- Festigkeitsentwicklung des Betons (E)

## 2.1.2 Porenarten und Porengrößenverteilung

In jeder Art von zementgebundenem Werkstoff gibt es einen gewissen Anteil an Poren. Grundsätzlich können in Beton folgende 4 verschiedenen Porenarten unterschieden werden:

- Verdichtungsporen
- Luftporen
- Kapillarporen
- Gelporen (A. Gerdes S.53 [40]).

Die betontechnologischen Maßnahmen durch welche die Anteile der einzelnen Porenarten gesteuert werden können sowie die zugehörigen Kapillargrößen sind in Tabelle 2-3 angeführt.

Tabelle 2-3: Klassifizierung der Poren in einem zementgebundenen Werkstoff nach *Setzer* und *IUPAC*  
(A. Gerdes S.53 [40])

Betontechnologische Maßnahmen	Porenart		Poreneinteilung nach Setzer [27]	Poreneinteilung nach IUPAC [29]
Verdichten	Verdichtungsporen	Grobporen	> 2 mm	-
Luftporenbildner	Luftporen	Makrokapillaren	50 µm - 2 mm	50 µm - 2 mm
w/z-Wert	Kapillarporen	Kapillaren	2 µm - 50 µm	2 µm - 50 µm
		Mikrokapillaren	50 nm - 2 µm	50 nm - 2 µm
Hydratation und Zementart	Gelporen	Mesoporen	2 nm - 50 nm	2 nm - 50 nm
		Mikroporen	< 2 nm	< 2 nm

In dieser Arbeit sollte eine Messvorrichtung für den Druck im Kapillarporenbereich entwickelt werden. Das bedeutet laut obiger Tabelle, dass ein Bereich zwischen 50 nm (Mikrokapillaren) bis 2 mm (Makrokapillaren) betrachtet werden sollte. Über die Entstehung von Kapillarporen wird auf das Kapitel 2.1.3 Wasserbindemittelwert und Erhärtungsprozess verwiesen.

Die Porengrößenverteilung von Beton ist im Vergleich zu anderen mineralischen Baustoffen weit gestreut wie der Abbildung 2-1 zu entnehmen ist.

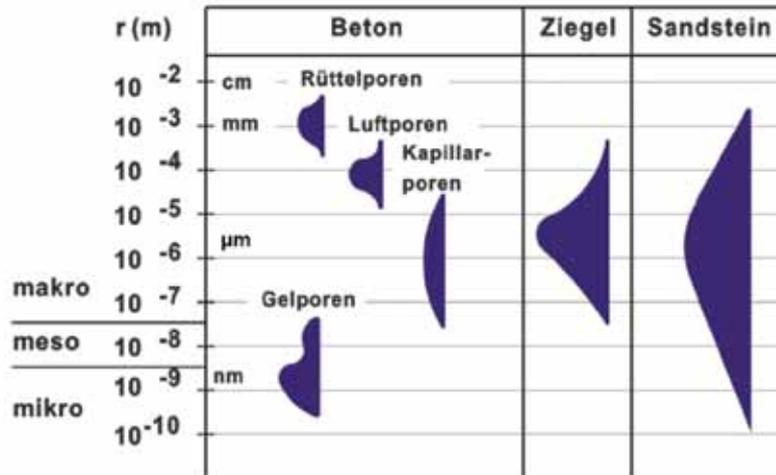


Abbildung 2-1: Porengrößenverteilung wichtiger anorganischer Baustoffe (*Calciumbo* [41])

Die Porengrößenverteilung ist ein wesentlicher Faktor sowohl für die zu erreichende Druckfestigkeit, als auch für die Wasseraufnahme- und Transporteigenschaften eines Betonbaukörpers. Eine Übersicht der Transportphänomene in Beton und deren Abhängigkeiten wird in Abbildung 2-2 gegeben.

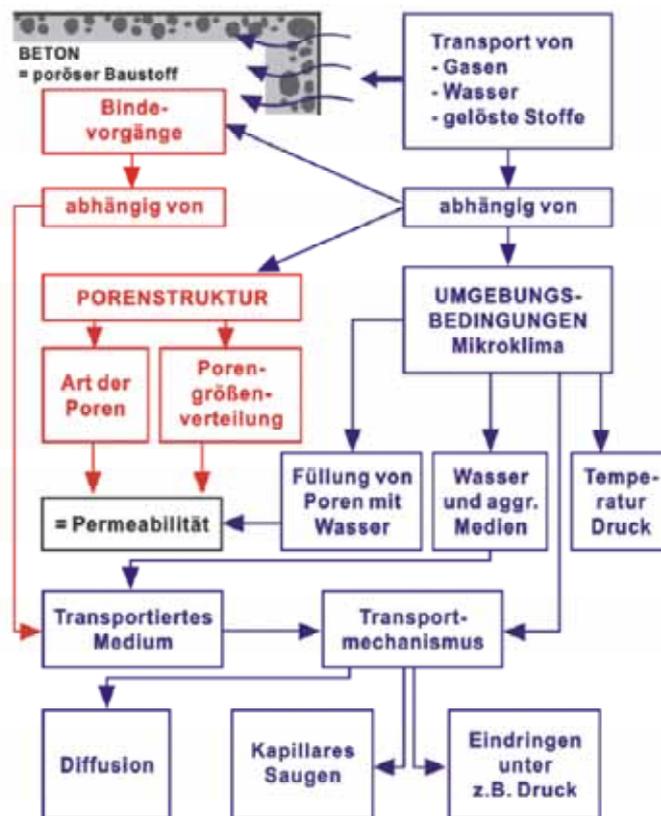


Abbildung 2-2: Transportphänomene in Beton (*K. Thienel* S.8 [46])

Darin bedeuten:

- **Permeabilität:** Durchlässigkeit für Gase und Flüssigkeiten
- **Diffusion:** Transport von Wasserdampf
- **Kapillares Saugen:** Wassertransport in Kapillarporen.

### 2.1.3 Wasserbindemittelwert und Erhärtungsprozess

Wenn Bindemittel (Zement) und Wasser gemischt werden, entsteht Zementleim. Ein wichtiger Parameter für die Güte des Betons ist u.a. das Masseverhältnis von Wasser zu Bindemittel (W/B-Wert) in der Betonmischung. Die beiden Bestandteile beginnen sofort mikroskopisch kleine kristallartige Strukturen zu bilden und füllen die Hohlräume zwischen den Zementkörnern und den Zuschlagskörnern aus. Das Gemisch erhärtet langsam und aus Zementleim wird Zementstein. Diese Reaktion zwischen Bindemittel und Wasser nennt man Hydratation. Damit es zur vollständigen Hydratation kommt braucht es in etwa einen W/B-Wert von 0,4. Dieses Wasser wird vom Bindemittel chemisch und physikalisch gebunden. Wird mehr Wasser verwendet, so bleibt es in 0,001 bis 0,01 mm großen Kapillarporen zurück und wird nicht zur Hydratation verbraucht. In Abbildung 2-3 sind die Auswirkungen von verschiedenen Wasserbindemittelwerten auf die Hydratation und das Korngefüge dargestellt.

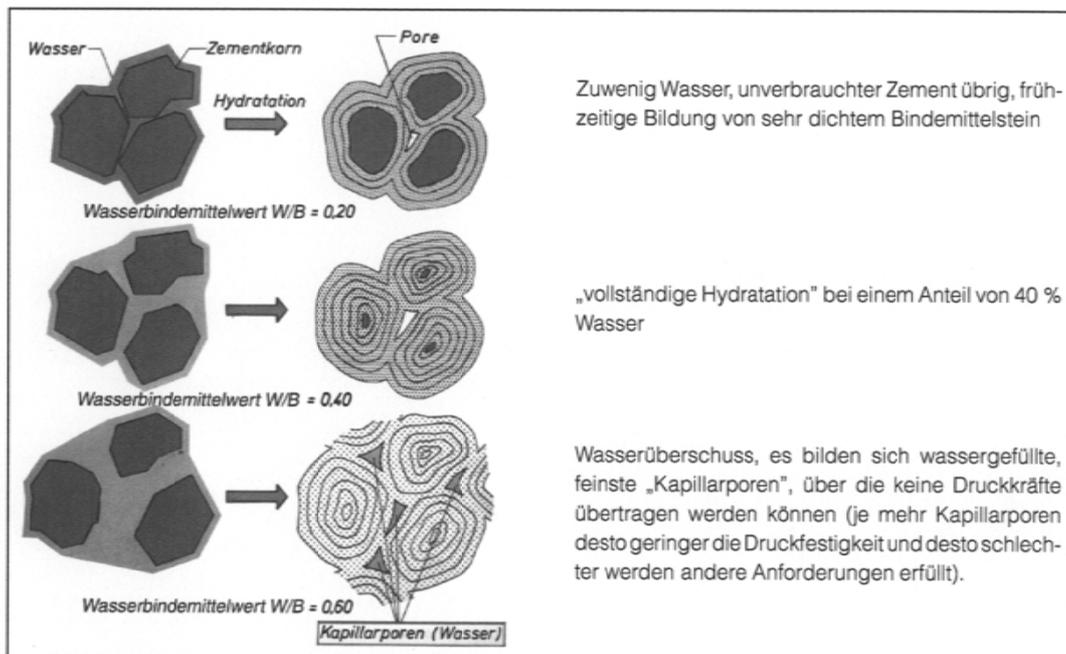


Abbildung 2-3: Hydratation bei verschiedenen W/B-Werten (BASF S.5 [5])

Je niedriger der W/B-Wert ist, desto höher ist die Festigkeit und die Beständigkeit des Betons, solange genug Wasser vorhanden ist, um mit dem Bindemittel vollständig abbinden zu können. Bei einem W/B-Wert  $\leq 0,4$  erreicht man schon innerhalb der ersten Tage des Aushärtens hohe Festigkeiten. Für Normalbetone liegt der W/B-Wert in etwa zwischen 0,4 bis 0,7. Betone mit W/B-Werten über 0,7 sind im Allgemeinen sehr porös und wasserdurchlässig, da sich die durch das ausdiffundierende Wasser entstandenen Porenhohlräume vernetzen, und so eine Kapillarsaugwirkung aufgebaut wird.

Je mehr Wasser beim Herstellen des Betons verwendet wird, desto mehr Kapillarporen enthält der Bindemittelstein. Sie sind zunächst mit Wasser gefüllt bis dieses verdunstet und mit Luft gefüllte Hohlräume zurückbleiben. Diese haben negative Eigenschaften auf die Betonfestigkeit, Beständigkeit, Dichtigkeit und den Korrosionsschutz. Der Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und dem W/B-Wert wurde von dem deutschen Betontechnologen Walz in einem Diagramm dargestellt (Abbildung 2-4).

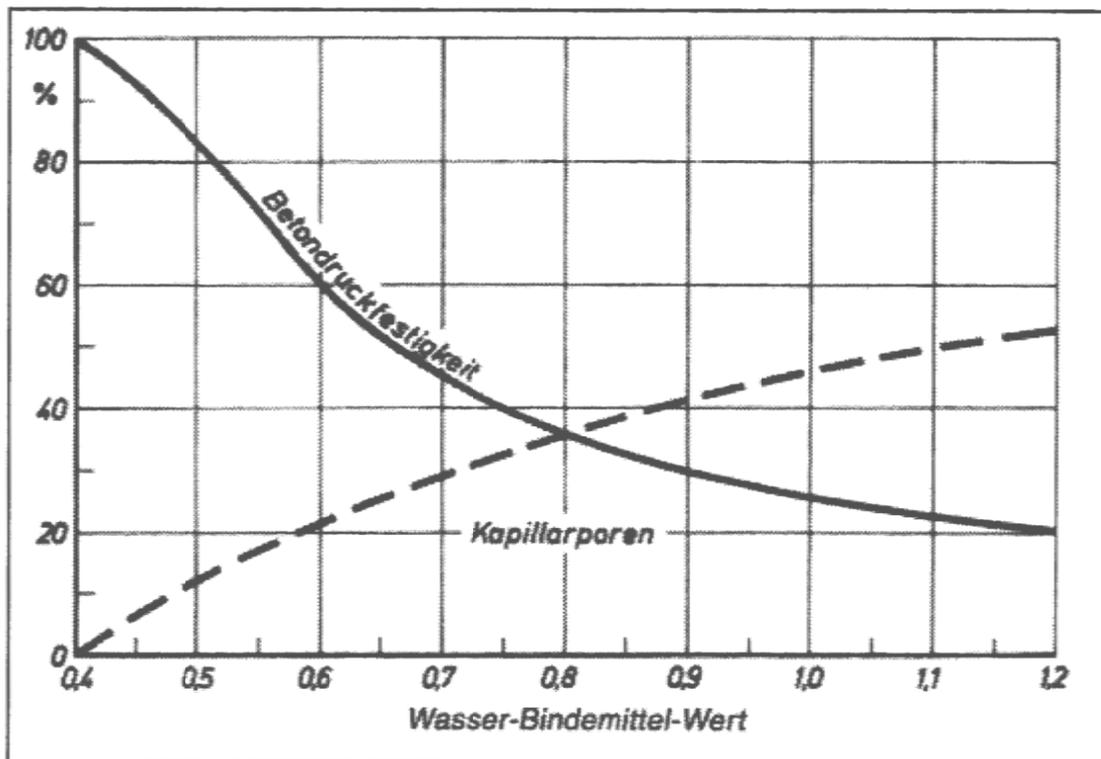


Abbildung 2-4: Walzkurve (Vereinigung der österreichischen Zementindustrie S.3 [6])

In Zahlen ausgedrückt entspricht der durch steigenden W/B-Wert hervorgerufene Rückgang der Druckfestigkeit folgenden Werten (siehe Tabelle 2-4).

Tabelle 2-4: Abfall der Betondruckfestigkeit mit steigendem W/B-Wert (G.Valentin, G.F. Kidéry S.40 [39])

W/B Wert	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Druckfestigkeit in %	100	83	64	48	37

Bei einem Porengehalt unter 27 % muss theoretisch noch unhydratisierter Zement enthalten sein. In Abbildung 2-5 ist eine rechnerisch ermittelte Zusammensetzung des voll hydratisierten Zementsteins und schematisch den Zustand des Zementleims vor Beginn und des Zementsteins nach Abschluss der Hydratation in Abhängigkeit vom W/B-Wert abgebildet.

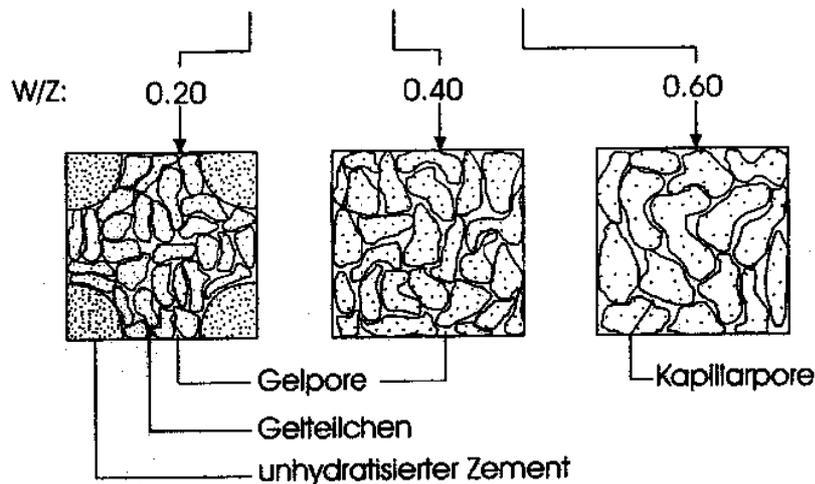


Abbildung 2-5: Zusammensetzung der Struktur des Zementsteins in Abhängigkeit vom W/B-Wert (U. Schneider S. 48 [8])

## 2.2 Zement

### 2.2.1 Allgemeines

Zement gehört zur Gruppe der hydraulischen Bindemittel. Das sind feingemahlene mineralische Stoffe, die nach dem Anmachen mit Wasser (Zugabewasser) sowohl an der Luft als auch unter Luftabschluß steinartig erhärten und danach wasserbeständig sind (BASF S.11 [9]). Zemente zeichnen sich durch ihre hohe Festigkeit, im Vergleich zu anderen

hydraulischen Bindemitteln aus. Sie werden nach ÖNORM EN 197-1, Zement-Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, genormt.

## 2.2.2 Erzeugung

Ein wesentlicher Bestandteil von Zement ist der gemahlene Portlandzementklinker. Der Rohstoff zur Herstellung des Klinkers besteht aus Kalkstein, Kalkmergel, etc. ( $\text{CaCO}_3$ ), Sande ( $\text{SiO}_2$ : Kieselsäure), Ton, Mergel ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ : Tonerde) und eisenoxidische Minderale ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : Eisenoxid). Diese Rohstoffe werden getrocknet, mehlfein zermahlen und bis zur Sinterung ( $1450^\circ\text{C}$ ) gebrannt, wodurch der Portlandzementklinker entsteht. Zement wird durch Feinmahlen von Portlandzementklinker und anderen mineralischen Stoffen hergestellt. Nebenprodukte des Portlandzementklinkers sind das freie  $\text{CaO}$  (freier Kalk) und das freie  $\text{MgO}$  (Periklas), sowie geringe Anteile von Alkalien.

Durch das Brennen und Sintern entstehen neue Verbindungen, die Klinkerphasen genannt werden. Die Anteile der Klinkerphasen und die Mahlfeinheit beeinflussen die Festigkeiten des Zements.

### **Für die Zementeigenschaften wesentliche Klinkerphasen**



Dem Tricalciumsilicat verdankt der Zement seine wesentlichen Eigenschaften. Es ist für die Frühfestigkeit des Zementes verantwortlich. Es entwickelt eine große Hydratationswärme beim Abbinden.



Dicalciumsilicat erhärtet ebenso wie das Tricalciumsilicat hydraulisch, jedoch langsamer, erreicht jedoch nach längerer Zeit die gleichen Festigkeiten.



Im Calciumaluminatferrit ist fast das gesamte im Klinker vorhandene Eisenoxid gebunden. Zur hydraulischen Erhärtung trägt sie wenig bei.



Der Teil des Aluminiumoxids, der im Calciumaluminatferrit nicht gebunden ist, bildet das Tricalciumaluminat. Es reagiert sehr schnell mit Wasser und erhärtet rasch. Da diese Eigenschaft das Verarbeiten des Betons extrem erschwert, wird dem Zement Gips zugegeben um diesem Effekt entgegenzuwirken. Die hydraulischen Eigenschaften von Tricalciumaluminat sind nicht sehr ausgeprägt, es trägt jedoch in Verbindung mit Silikaten zur Erhöhung der Anfangsfestigkeit des Zementsteins bei.

In einem handelsüblichen Portlandzement wie er auch im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendet wurde, sind in etwa die in

Tabelle 2-5 angegebenen Anteile vorhanden.

Tabelle 2-5: PZ-Klinkerphasen, Eigenschaften und Massenanteile (U. Schneider S.39 [10])

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

### 2.2.3 Hydratation

Durch chemische Reaktion der Klinkerphasen mit dem Anmachwasser erfolgt das Erstarren und die Erhärtung des Zementleims. Dabei bilden sich wasserunlösliche Verbindungen, die Hydratphasen oder Hydratationsprodukte genannt werden.

Man unterscheidet folgende Reaktionsstufen:

#### **Hydratationsstufe I**

Diese umfasst den Reaktionsverlauf kurz nach dem Anmachen. Im zunächst plastischen Zementleim bilden sich Calciumhydroxid  $\text{Ca(OH)}_2$  und Trisulfat, das mit seinen feinen Nadeln nur zu einer geringen Versteifung führt. Bei Erstarrungsbeginn nach 1 bis 3 Stunden bilden sich lange Trisulfatnadeln, die die Zwischenräume zwischen den Zementteilchen überbrücken. Durch diesen Vorgang wird der Zementleim steif.

#### **Hydratationsstufe II**

Neben den Trisulfatkristallen bilden sich nach 4 bis 8 Stunden langfaserige CSH-Kristalle, die den Raum zwischen Zementpartikeln überbrücken und ein poriges Grundgefüge bilden. Mit der Bildung von CSH-Phasen tritt eine Verfestigung ein, die Erstarrung genannt wird.

#### **Hydratationsstufe III**

Bei dieser Stufe werden die Poren durch feinkristallines kurzfasriges CSH weiter angefüllt, in das die tafelförmigen Kristalle des  $\text{Ca(OH)}_2$  eingebettet sind. Das Grundgefüge verdichtet sich, die Festigkeit steigt an. Der Porenraum nimmt stetig ab und der Zementstein erhärtet. Die meisten Reaktionen sind nach 28 Tagen abgeschlossen, aber insgesamt dauert der Erhärtungsvorgang Monate bzw. Jahre (*U.Schneider* S.41 f. [8]).

Die zuvor erklärten Hydratationsstufen und die dazugehörige Gefügeentwicklung sind noch einmal schematisch zur besseren Veranschaulichung in Abbildung 2-6 zu sehen.

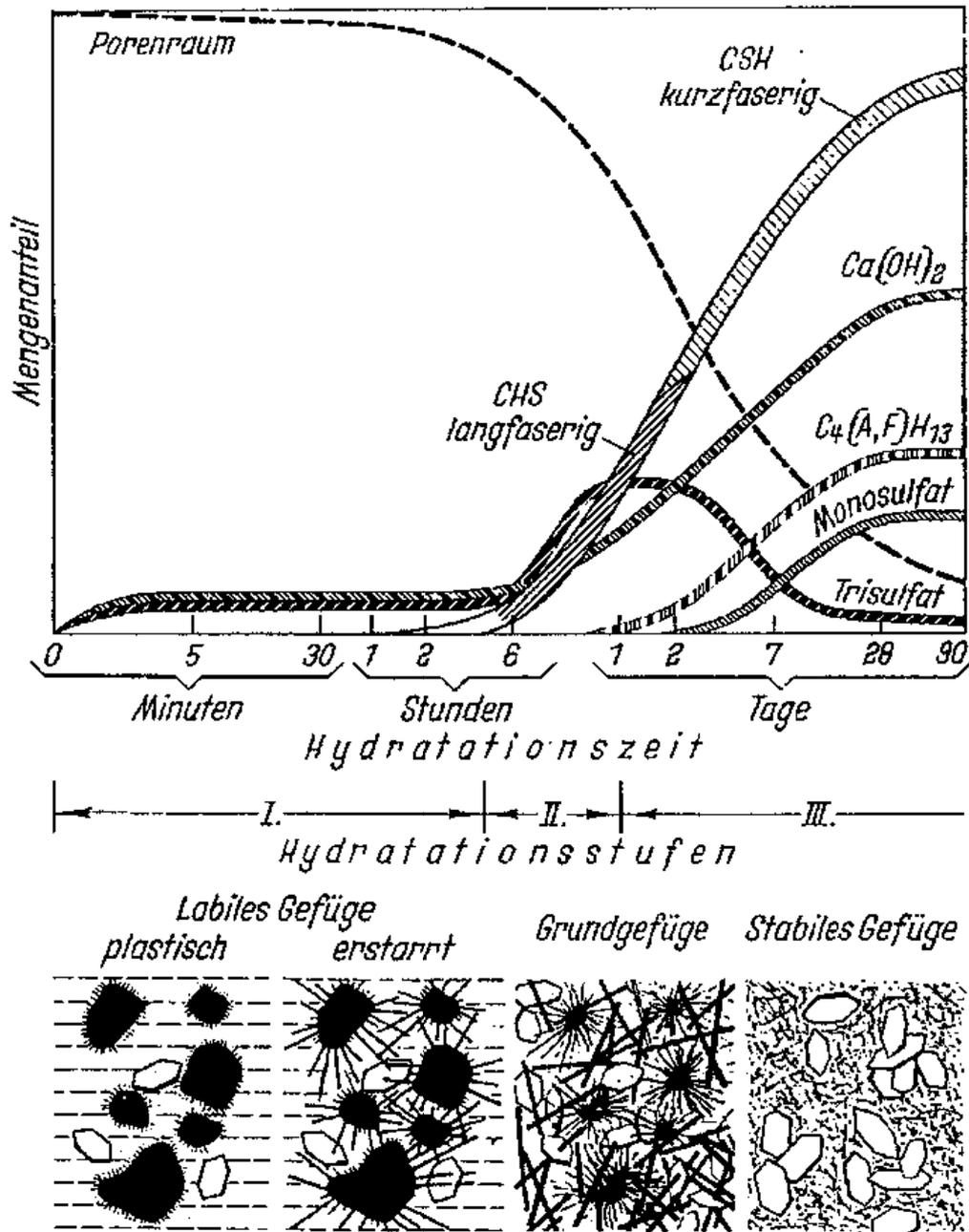


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Hydratphasen und der Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zementes (U.Schneider S.43 [8])

## 2.2.4 Bezeichnung

Die genaue Bezeichnung nach ÖNORM EN 197-1 erfolgt folgendermaßen:

### 1. Name der Hauptgruppe und Nennung der Norm (EN 197-1), Bindestrich

### 2. Bezeichnung der Hauptgruppe, Schrägstrich

Hauptgruppen nach dem Anteil an Portlandzementklinker und den mengenmäßigen Anteilen an Zusatzstoffen:

- |        |     |                          |
|--------|-----|--------------------------|
| 1. CEM | I   | Portlandzement           |
| 2. CEM | II  | Portland(komposit)zement |
| 3. CEM | III | Hochofenzement           |
| 4. CEM | IV  | Puzzolanzement           |
| 5. CEM | V   | Kompositzement           |

### 3. Angabe der Zusatzstoffmenge (A,B,C, siehe Tabelle 2-6)

Tabelle 2-6: Bezeichnung der Zusatzstoffmenge (U. Schneider S. 35 [4])

CEM I		nur Zumahlung $\leq 5$ %			
CEM II / A		Zumahlung von 6	bis	20 %	Masse *)
CEM II / B		Zumahlung von 21	bis	35 %	Masse
CEM III / A		Zumahlung von 36	bis	65 %	Masse (nur S)
CEM III / B		Zumahlung von 66	bis	80 %	Masse (nur S)
CEM III / C		Zumahlung von 81	bis	95 %	Masse (nur S)
CEM IV / A		Zumahlung von 11	bis	35 %	Masse
CEM IV / B		Zumahlung von 36	bis	55 %	Masse
CEM V / A		Zumahlung von 18	bis	30 %	Masse (P, Q, V) u. (S)
CEM V / B		wie A, jedoch 31	bis	50 %	Masse

### 4. Angabe der Zusatzstoffart (S,V,...)

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| S | Hüttensand (Hochofenschlacke) |
| V | silikatische Flugasche        |

W	kalkreiche Flugasche
D	Mikrosilica
L	Kalkstein (TOC $\leq$ 0,50 % Masse)
LL	Kalkstein (TOC $\leq$ 0,20 % Masse)
P	natürliches Puzzolan
Q	künstliches Puzzolan
T	gebrannter Schiefer
M	Mixture mit Angabe der Komponenten, z. B.: M (S-V-L)

Durch Zusatzstoffe können die Eigenschaften des Portlandzementklinkers verändert werden. Meist sinkt die Druckfestigkeit mit steigendem Anteil der Zumahlstoffe.

**5. Angabe der Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen**

**6. Angabe über die Frühfestigkeit (N: normal, R: rapid)**

Der in dieser Arbeit verwendete Zement der Firma Lafarge war ein **EN 197-1 - CEM II/A-S 42,5 R WT 42**, also ein Portlandkompositzement mit einer Zugabe von Hüttensand von 6 bis 20 %, einer Mindestdruckfestigkeit von 42,5 N/mm<sup>2</sup>, schnellhärtend und der Wärmeentwicklungsklasse WT 42 gemäß ÖNORM B 3327-1 entsprechend.

## 2.3 Gesteinskörnungen für Beton

### 2.3.1 Allgemeines und Einteilung

Gesteinskörnungen (Zuschläge) für Beton sind ein Gemenge von Körnern aus natürlichem oder künstlichem, dichtem oder porigem Gestein. Sie bilden mengen- und volumenmäßig den Hauptbestandteil von Beton und deshalb haben ihre Eigenschaften auch einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Betons.

Eine Übersicht über verschiedene Arten von Gesteinskörnungen und ihre Anwendung ist in Tabelle 2-7 angeführt.

Tabelle 2-7: Übersicht über die Arten von Gesteinskörnungen (U. Schneider S.7 [4])

		Gesteinskörnung für ...	natürliche Gesteinskörnungen		Industriell hergestellte Gesteinskörnungen
			natürlich gekörnt	mechanisch zerkleinert	(einschl. Recycling - Gesteinskörnung)
Gesteinskörnungen mit	dichtem Gefüge	Schwerbeton	Schwerspat (Baryt BaSO <sub>4</sub> )  Magnetit (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	gebrochener Schwerspat, Magnetit, Hämatit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Limonit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O), Ilmenit (FeTiO <sub>3</sub> ), Serpentin (Mg[(OH) <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ])	Stahlschrott, Stahlspäne, Stahlsand, Sintererze, Ferrosilizium, Ferrophosphor, Schwermetallschlacke
	Normalbeton, Mörtel	Flußsand, Flußkies, Grubenkies	Brechsand, Splitt, Steinschlag, Schotter aus gesundem Naturstein	Metallschlacken, Betonklinkerbruch, künstlicher Korund, Siliziumkarbid, Sintersplitt, Fasern aller Art	
	porrigem Gefüge	Leichtbeton, Leichtmörtel	sehr feine Natursande (GB), Naturbims, Lavakies, Lavasand (Lapillis), Kieselgur	Schaumlava gebrochen, Tuffe gebrochen, Holzfasern, Holzspäne, Holzwolle, Holzmehl	Blähperlit (geblähter Obsidian), Blähglimmer (Vermiculite), Blähschiefer, Blähton, Diatomit (gesint. Kieselgur), Ziegelsplitt, Steinkohlenschlacke, Steinkohlenschlacke, Müllschlacke, granulierte HOS, Hüttenbims, Sinterbims, Schaumkunststoffe

Für die Herstellung des Betons im Rahmen dieser Arbeit wurden Kiessande (Rundkorn) als Zuschlag verwendet. Kiessande werden aus Fluss- oder Gletschergeschieben durch Baggern und Saugen gewonnen und danach in den meisten Fällen in Aufbereitungsanlagen gewaschen, nach Korngruppen getrennt bzw. gemischt. Die mineralogische Zusammensetzung ist sehr heterogen und ständig wechselnd. Das Rundkornmaterial zur Herstellung der Betonprüfkörper wurde von der Firma *Kies Union* bezogen.

### 2.3.2 Kornzusammensetzung

Um eine möglichst belastbare und widerstandsfähige Kornzusammensetzung zu erhalten ist eine Abstufung der Korngruppen nach gewissen Regeln erforderlich. Ein Gemisch mit zu großen Körnern hätte einen sehr großen Gehalt an Hohlräumen die für einen dichten Beton mit Zementleim aufgefüllt werden müssten und dadurch hohe Kosten und ein großes Schwindmaß verursachen würde. Außerdem wirkt sich ein großer Zementleimanteil negativ auf die Betonendfestigkeit aus. Es ist also zweckmäßig, dass die Hohlräume statt nur mit Zementleim auch mit abgestuften kleineren Körnern ausgefüllt werden.

Zur Ermittlung günstiger Kornzusammensetzung dient die Sieblinie. Darunter versteht man die grafische Darstellung der Kornzusammensetzungen von Gesteinskörnungen. Die Sieblinie gibt für jede Körnung den Rückstand auf den zugehörigen Prüfsieben an.

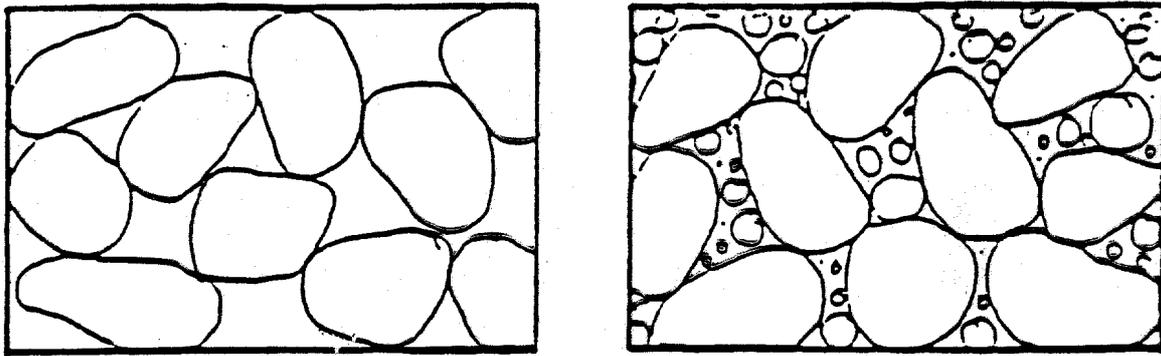


Abbildung 2-7: Schema der Verminderung des Hohlraums bei einem Einkornmisch durch Zugabe von kleinen Körnern (U. Schneider S.32 [4])

In der ÖNORM B 4710–1 sind für verschiedenes Größtkorn die entsprechenden Regelsieblinien A, B und C angegeben. Der günstige Bereich einer Sieblinie liegt zwischen den Regelsieblinien A und B und wird im Normalfall in der Praxis angestrebt. Als Beispiel ist in Abbildung 2-8 die Grenzsieblinie für Größtkorn 16 mm dargestellt. Diese wurde auch zur Abstufung der Kornzusammensetzung des in dieser Arbeit verwendeten Betons verwendet.

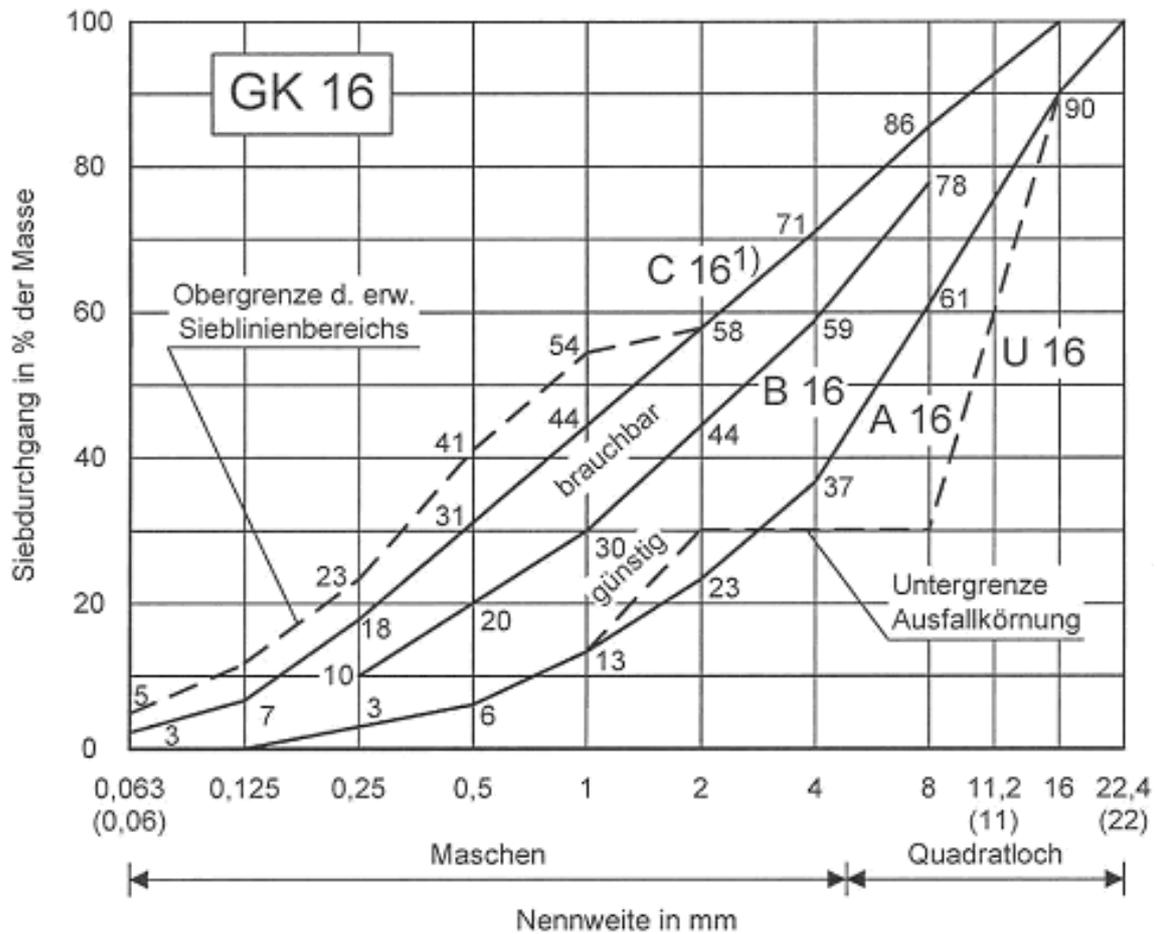


Abbildung 2-8: Grenzsieblinie GK 16 mm (ÖNORM B 4710-1 S.35 [10])

## 2.4 Zusatzmittel

Betonzusatzmittel sind Stoffe die dem Beton in feinverteilter Form (flüssig, pulverförmig, in bestimmten Fällen auch als Granulat oder als Paste) in geringen Mengen zugesetzt werden, um durch chemische oder physikalische Wirkung bestimmte Eigenschaften des Frischbetons oder des erhärteten Betons zu beeinflussen (BASF S.49 [9]). Die Zugabemenge darf 50 g/kg bezogen auf das Zementgewicht nicht überschreiten. Die Arten und Wirkungen von Zusatzmitteln sind in Tabelle 2-8 aufgelistet.

Tabelle 2-8: Arten und Wirkungen von Zusatzmitteln (U. Schneider S. 54 [4])

Kurzbezeichnung	Art des Zusatzmittels	erwartete Wirkung	mögliche Nebenwirkungen
BV	Betonverflüssiger (Sulfatablauge, Eiweißabbau- produkte)	Verminderung des Wasseranspruchs, Verbesserung der Verarbeitbarkeit	erhöhtes Schwinden, Verzögern, Lufteführung
LP	Luftporenbildner (Schäumittel, Öle, Fette, Kiefernwurzelharz)	Einführung kleiner, gleichmäßig verteilter Luftporen, Verbesse- rung der Verarbeit- barkeit	erhöhtes Schwinden, Festigkeitsminderung, Luftführung kann zu groß werden, Ver- zögerung
DM	Betondichtungsmittel (begrenzt quellfähige, wasserabweisende Sub- stanzen)	Verminderung der Wasseraufnahme, Verminderung des Eindringens von Was- ser	erhöhtes Schwinden, Umschlagen in der Wirkung
VZ	Erstarrungsverzögerer (anorganische oder or- ganische Stoffe wie Stär- ke, Zuckerarten, Natri- umphosphate, Gips, Borverbindungen)	Verzögerung des Erstarrens	erhöhtes Schwinden, Umschlagen in der Wirkung
ST	Stabilisierer (anorgani- sche, wasserlösliche Verbindungen)	Verbesserung des Zusammenhaltever- mögens und der Ver- arbeitbarkeit	
BE	Erstarrungsbeschleuni- ger (Alkalikarbonate, Aluminate, Ca-Chlorid, org. Stoffe)	Beschleunigung des Erstarrens	Festigkeitsminderung, Umschlagen der Wir- kung
FM	Fließmittel (Super- verflüssiger) Melamin- harzbasis und Ligninsul- fonate	Verflüssiger, Vermi- nerung des Wasser- anspruchs, W/Z - Wert < 0,4 möglich bei guter Verarbeit- barkeit	erhöhtes Schwinden
EH	Einpreßhilfen für Eipreßmörtel mit Spann- beton (Aluminiumpulver [treibende Komponente + Verflüssiger + verzö- gernde Komponente])	Vermindertes Abset- zen, mäßiges Quel- len, verbessertes Fließen, verminderter Wasseranspruch	Verzögerung

### Fließmittel

Sie wirken im allgemeinen zwei – bis dreimal so stark wie die normalen Betonverflüssiger.  
Aus verarbeitungstechnischer Sicht sind bei den Fließmitteln zwei Gruppen zu unterscheiden:

- solche auf der Basis von Melamin-Formaldehyd- Polykondensat
- und solche auf der Basis von synthetischen Mitteln auf der Basis von Naphthalinderivaten (BASF S.98 [9]).

In Abbildung 2-9 ist die große Auswirkung von Fließmitteln und Verflüssigern auf das Ausbreitmaß und den Wasseranspruch des Betons größenordnungsmäßig dargestellt.

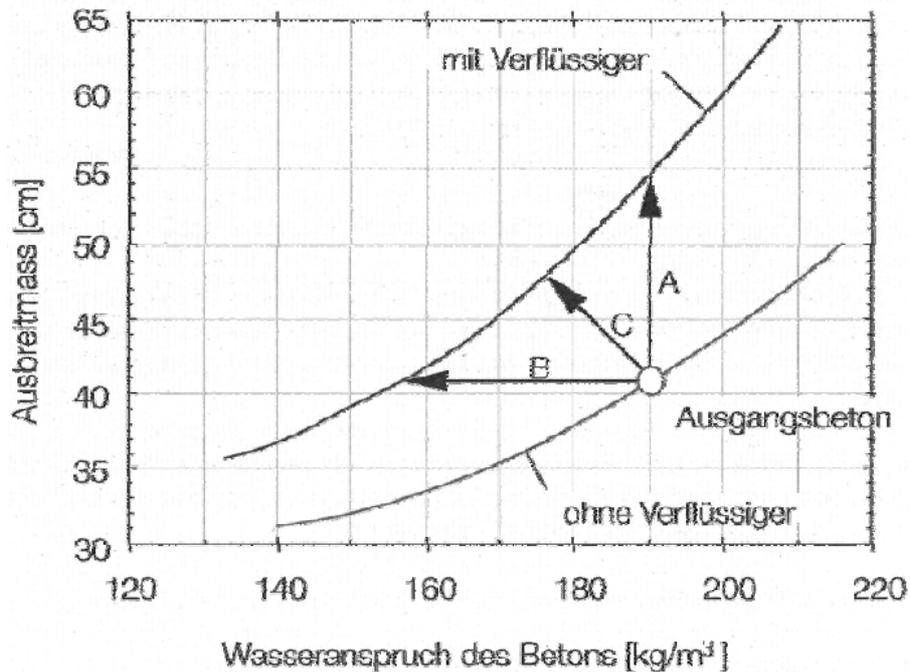


Abbildung 2-9: Wirkungsweise von Verflüssiger und Fließmittel auf Wasseranspruch und Konsistenz (IFB S.1 [38])

Die verflüssigende Wirkung der Fließmittel ist, abhängig von der Betontemperatur, nach 20 bis 40 Minuten beendet. Fließmittel werden deshalb meist erst kurz vor dem Betoneinbau beigemischt.

Zur Herstellung der Betonkörper im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Fließmittel *Dynamon SX 14* der Firma *Mapei* auf Basis formaldehydfreier, nicht sulfonierter Acryl-Polymere verwendet.

## 2.5 Faserbeton

### 2.5.1 Allgemeines

Fasern erhöhen die Duktilität und die Schlagfestigkeit von Beton durch ihre rißverteilende Wirkung. Im Betonbau werden vor allem Fasereigenschaften, wie Zugfestigkeit und Steifigkeit ausgenutzt (*BiM* [47]). Eine weitere interessante Anwendung die auch in dieser Arbeit angewandt wurde ist die Zumischung von Polypropylenfasern zur Verbesserung des Abplatzverhaltens unter Brand. Fasern gehen wie andere Betonzusatzstoffe in die Stoffraumrechnung ein. Art, Typ und Menge der jeweils zugesetzten Fasern sind unabhängig vom speziellen Anwendungsfall und müssen im Einzelfall beurteilt werden.

Fasern können aus:

- Glasfasern
- AR-Glasfasern (Aramidfasern)
- Stahlfasern
- Carbonfasern
- Polypropylenfasern bestehen.

In Tabelle 2-9 sind die Einwirkungen der einzelnen Fasertypen auf die Betoneigenschaften aufgelistet.

Tabelle 2-9: Einfluss von Fasern auf die Betoneigenschaften (*Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik* S. 44 f. [18] mit Ergänzungen von Prof. U. Schneider)

<b>BETONEIGENSCHAFTEN BIS 10 STD. AUSHÄRTUNG</b>	<b>STAHLFASERN</b>	<b>PP-FASERN</b>	<b>GLAS-FASERN</b>
Schwinden Bluten Grünstandsfestigkeit	geringer Einfluss geringer Einfluss wesentliche Verbesserung	wesentliche Verbesserung wesentliche Verbesserung wesentliche Verbesserung	geringe Verbesserung geringe Verbesserung wesentliche Verbesserung
<b>FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN VON 10 STD.-3 TAGE</b>	<b>STAHLFASERN</b>	<b>PP-FASERN</b>	<b>GLAS-FASERN</b>
Druckfestigkeitsentwicklung	geringe Erhöhung der Druckfestigkeit	geringe (keine) Erhöhung der Druckfestigkeit	-
Druckzähigkeit	Die Last kann nach sichtbarem Anriss weiter ansteigen; beim Erreichen der max. Druckfestigkeit fällt die Last nicht wie bei O-Beton ab, sondern bleibt noch lange erhalten und fällt danach erst langsam ab.	zur Zeit nicht gemessen	zur Zeit nicht gemessen
E-Modul	geringer Einfluss	kein Einfluss	kein Einfluss

Beitrag zur Entwicklung einer Messanordnung zur Ermittlung des Kapillarporendruckes von Normalbeton unter  
Brandbeanspruchung

Kriechen / Schwinden	wesentlicher Einfluss auf Spannungs/Dehnungseigenschaften unter Druckbeanspruchung	Geringer Einfluss auf Spannungs/Dehnungseigenschaften unter Druckbeanspruchung jedoch wesentliche Verbesserung bei extremen Austrocknungsbedingungen.	-
Biegezugfestigkeit / Anrissfestigkeit	Erhöhung im jungen Alter	geringer Einfluss Mit zunehmender Festigkeitsentwicklung nimmt der Einfluss der Fasern ab.	geringer Einfluss
Äquivalente Biegezugfestigkeit (Nachrisszugfestigkeit)	Je nach Leistungsklasse bilden die Fasern nach Versagen des Betons Fließgelenke und erhalten die Tragfähigkeit. Im jungen Alter sogar höhere Werte als mit Stahlbeton möglich.	geringer Einfluss Mit zunehmender Festigkeitsentwicklung nimmt der Einfluss der Fasern ab.	geringer Einfluss Mit zunehmender Festigkeitsentwicklung nimmt der Einfluss der Fasern ab.
<b>FESTBETONEIGENSCHAFTEN 28 TAGE UND DANACH</b>	<b>STAHLFASERN</b>	<b>PP-FASERN</b>	<b>GLAS-FASERN</b>
Druckfestigkeit	unwesentlicher Einfluss	unwesentlicher Einfluss	unwesentlicher Einfluss
Druckzähigkeit	weiterhin wie im Frühfestigkeitszustand	-	-
E-Modul	unwesentlicher Einfluss	unwesentlicher (kein) Einfluss	unwesentlicher Einfluss
Kriechen / Schwinden	wesentlicher Einfluss auf Spannungs/Dehnungseigenschaften unter Druckbeanspruchung	kein Einfluss auf Spannungs/Dehnungseigenschaften unter Druckbeanspruchung	kein Einfluss auf Spannungs/Dehnungseigenschaften unter Druckbeanspruchung
Biegezugfestigkeit (Erstriss)	unwesentlicher Einfluss geringere Prüfstreuung	unwesentlicher (kein) Einfluss geringere Prüfstreuung	-
Äquivalente Biegezugfestigkeit (Nachrissverhalten)	weiterhin wie im Frühfestigkeitszustand	unwesentlicher Einfluss	-
Arbeitsvermögen / Zähigkeit	Spannungsumlagerungen abhängig von der Stahlgüte, Schlankheit Verbundeigenschaft und Dosierung der Stahlfasern möglich	unwesentlicher Einfluss	
Rissbreitenbeschränkung	abhängig von der Faserbetonklasse	-	-
Schub / Spaltzugfestigkeit	deutliche Erhöhung	-	-
Stoßfestigkeit	deutliche Erhöhung	geringe Erhöhung	geringe Erhöhung
Schlagzähigkeit	deutliche Erhöhung	geringe Erhöhung	Abnahme mit zunehmendem Alter
Brandverhalten	besserer Zusammenhalt der Betonoberfläche	deutliche Verringerung der Betonabplatzungen	Verhalten zur Zeit nicht bekannt
	besonders geeignet ist die Kombination Stahl + PP-Fasern		-
Frost-Tausalzbeständigkeit	-	deutliche Verbesserung	Verhalten zur Zeit nicht bekannt
Wassereindringtiefe	-	merkbare Reduktion	-
Langzeitverhalten	keine wesentlichen Leistungsabfälle Betonplatzungen durch Korrosion lediglich ab Faserquerschnitten > 2,00 mm zu erwarten	keine wesentlichen Leistungsabfälle	kurze Dauerhaftigkeit bei C- und E-Glas Geringe Leistungsabfälle bei AR-Glas

Für diese Arbeit wurden bei den Betonmischungen RK 01 und RK 01\* (siehe Kapitel 4.2) bei denen keine Betonabplatzungen auftreten sollten Polypropylenfasern verwendet.

## 2.5.2 Polypropylenfasern (Kunststofffasern)

### Allgemeines

Propylen ist ein ungesättigten Kohlenwasserstoff, der durch Polymerisation gewonnen wird. Es ist gegen die meisten Laugen und Säuren beständig. Deshalb wird Polypropylen durch die Alkalität des Betons nicht beeinträchtigt (*U. Schneider* S.14 [4]).

PP-Fasern die durch Extrusion hergestellt werden haben eine runde Querschnittsform. Jene die durch Spleißung einer Folie hergestellt werden weisen einen eckigen Querschnitt auf. Die Querschnittsform und Oberflächenbeschaffenheit beeinflussen maßgeblich das Verbundverhalten. Polypropylenfasern werden mit Durchmesser von 0,01 bis 0,3 mm hergestellt. Die Arten und Eigenschaften von PP-Fasern sind in Tabelle 2-10 dargestellt.

Tabelle 2-10: Arten und Eigenschaften von Polypropylenfasern (*U.Schneider* S.15 [4])

Art der Herstellung	Art	Zugfestigkeit des Fadens [N/mm <sup>2</sup> ]	Form in Längsrichtung	Länge l <sub>f</sub> [mm]	Querschnitt	Breite/Durchmesser [µm]	Oberflächenbeschaffenheit
gesponnen	monofil	300 - 700	gerade gewellt	6-36	rund	10-50	glatt, rauh
gestanzt/ geschnitten	fibrilliert	300 - 700	gerade	6-36	eckig	50 - 300	glatt, rauh
gespleißt	-	300 - 700	gerade	10-36	eckig		rauh

Man unterscheidet

- Spleißfasern (Spleißung einer Folie)
- fibrillierte Polypropylenfasern (mehrere Einzelfasern hängen zu einer Einheit zusammen und werden beim Mischen vereinzelt, siehe Abbildung 2-10)

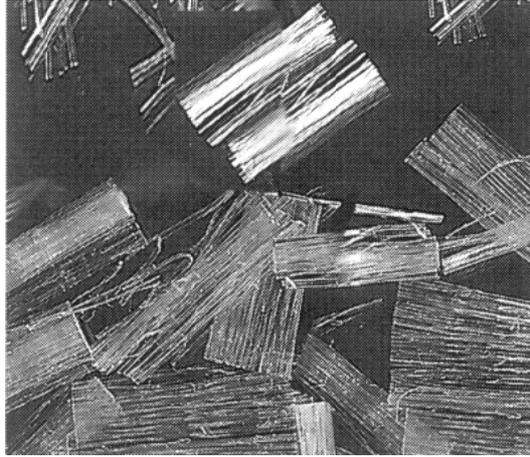


Abbildung 2-10: fibrillierte Fasern (*Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik* S. 11 [19])

- monofilamentale Polypropylenfasern (die Fasern hängen nicht zusammen – Einzelhaarfaser, siehe Abbildung 2-11)

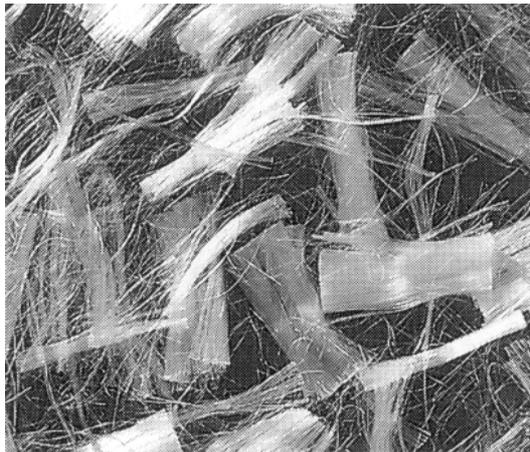


Abbildung 2-11: monofilamentale Fasern (*Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik* S.11 [19])

Die Zugabe von Polypropylenfasern wirkt sich positiv auf das Schwindverhalten, sowie auf das Brandverhalten aus. Diese schmelzen im Brandfall und schaffen so Kanäle aus denen der Wasserdampf entweichen kann (*Spektrum der Wissenschaft* [10]).

Meist kommen im Brandschutz monofilamentale PP-Fasern zum Einsatz. Auch im Zuge dieser Arbeit wurden diese Fasern mit 6 mm Länge und 15  $\mu\text{m}$  Durchmesser verwendet.

In Abbildung 2-12 ist die Veränderung der PP-Fasern während einer Temperaturbelastung dargestellt. Ab 160°C beginnen etwa die Fasern zu Schmelzen (1. Peak) und ab 205 °C

zersetzen sich die Fasern. Am 3. Peak bei ca. 380 °C sind die Zerstörungsreaktionen vollständig abgeschlossen.

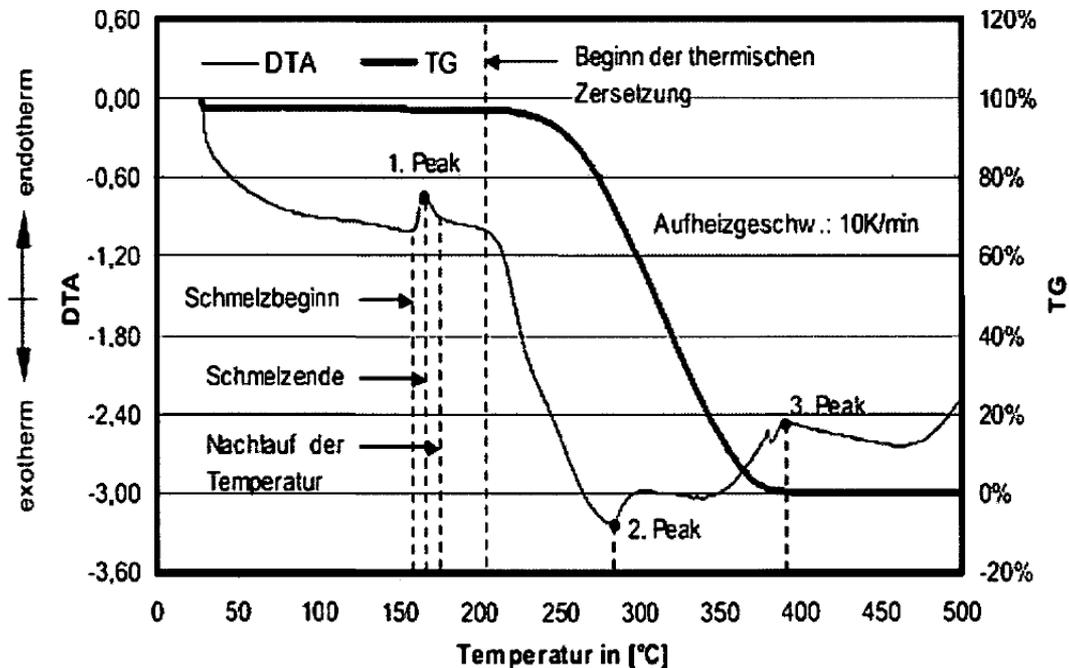


Abbildung 2-12: Thermogravimetrische Untersuchungen von Polypropylenfasern, Aufheizgeschw. 5 K/min (J. Horvat et al. S.132 [37])

## Wirkungsweise

Die Verwendung von monofilamenten Fasern hat 3 Wirkungen (entnommen aus *Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik* S. 62 [18], nach J. Horvath S. 43 [15]).

### 1. Filtration durch die Übergangszonen

Betrachtet man die Struktur im Übergangsbereich zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix, so zeigt sich, dass sich an diesen Grenzflächen Poren und weiche Hydratationsprodukte wie Portlandit und Ettringit anhäufen. Die Dicken dieser Übergangszonen sind primär vom W/B-Wert, von der Bindemittelart und vom Mikrosilikagehalt abhängig.

Diese Zonen ermöglichen im Prinzip einen höheren Stofftransport (Feuchtediffusion), sie sind aber nur teilweise miteinander verbunden. Durch die Zugabe von PP-Fasern bilden sich zusätzliche Übergangszonen um die Fasern, die eine Verbindung zwischen den verschiedenen Übergangszonen bewirken und somit das System filtrationsfähiger, bzw. permeabler machen (siehe Abbildung 2-13).

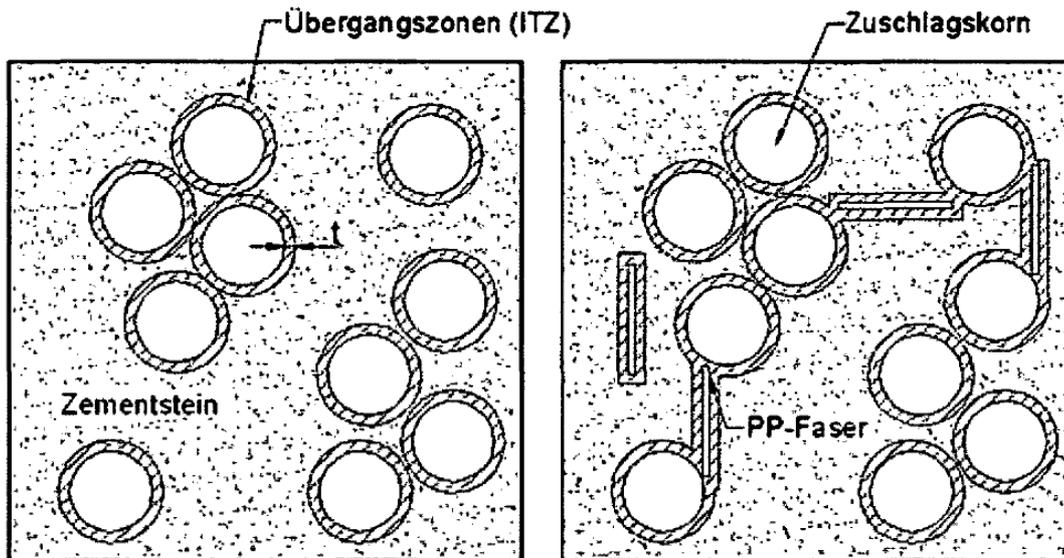


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Permeabilitätstheorie (J. Horvath S.43 [15])

2. Filtration durch Bildung von Kapillarporen beim Abschmelzen der Fasern.
3. Filtration durch Bildung von Mikroporen beim Einmischen der Fasern selbst (Strukturauflockerung).

Durch diese Wirkungen entsteht im Betonkörper ein Filtrationssystem, wodurch sich der Wasserdampfdruck abbauen kann.

### Faserdimension und Dosierung:

Es hat sich in Untersuchungen gezeigt, dass kurze Fasern mit etwa 6 mm Länge bessere Ergebnisse hervorbringen als längere Fasern.

Als Mindestdosierung wird bei einem C25/30 ca. 1 kg/m<sup>3</sup> angenommen. Je höher die Betongüte, desto höher muss auch die Dosiermenge sein. Betongüten über der Druckfestigkeitsklasse C50/60 benötigen eine Dosiermenge von 2 bis 5 kg/m<sup>3</sup>. Eine Dosierung über 5 kg/m<sup>3</sup> ist nicht mehr sinnvoll, da die Verarbeitbarkeit unter vertretbaren Aufwendungen nicht mehr gegeben ist (*Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik* S. 62 [18]). Bei einer Mischung für diese Arbeit wurde eine Dosierung von 1,50 kg/m<sup>3</sup> mit monofilamenten Polypropylenfasern verwendet.

## 2.6 Verhalten von Normalbeton bei Brand

### 2.6.1 Verhalten von Normalbeton bei Temperaturen von weniger als 300°C

Bei Temperaturen  $\leq 100$  °C wird der Beton überhaupt nicht geschädigt. Auch bei Temperaturen von bis zu ca. 200 °C tritt noch keine Schädigung auf. Bei sorgfältiger Herstellung und Nachbehandlung, sowie entsprechender Auswahl der Betonrezeptur kann Beton auch Temperaturen von bis zu 250 °C auf Dauer ohne eine grobe Beeinträchtigung überstehen (K. Kordina; R. Meyer-Ottens S.52 [36]). Über 250 °C können dann bereits einzelne, an der Betonoberfläche liegende Zuschlagkörner zerplatzen. Das eine Temperaturbelastung bis 250 °C noch keine große Beeinträchtigung der Festigkeitseigenschaften mit sich bringt ist aus Abbildung 2-14 ersichtlich. Die angegebenen Prüftemperaturen stellen jeweils die mittleren Temperaturen der Prüfquerschnitte dar, d.h. die geprüften Betonproben waren stets vollständig durchwärmt.

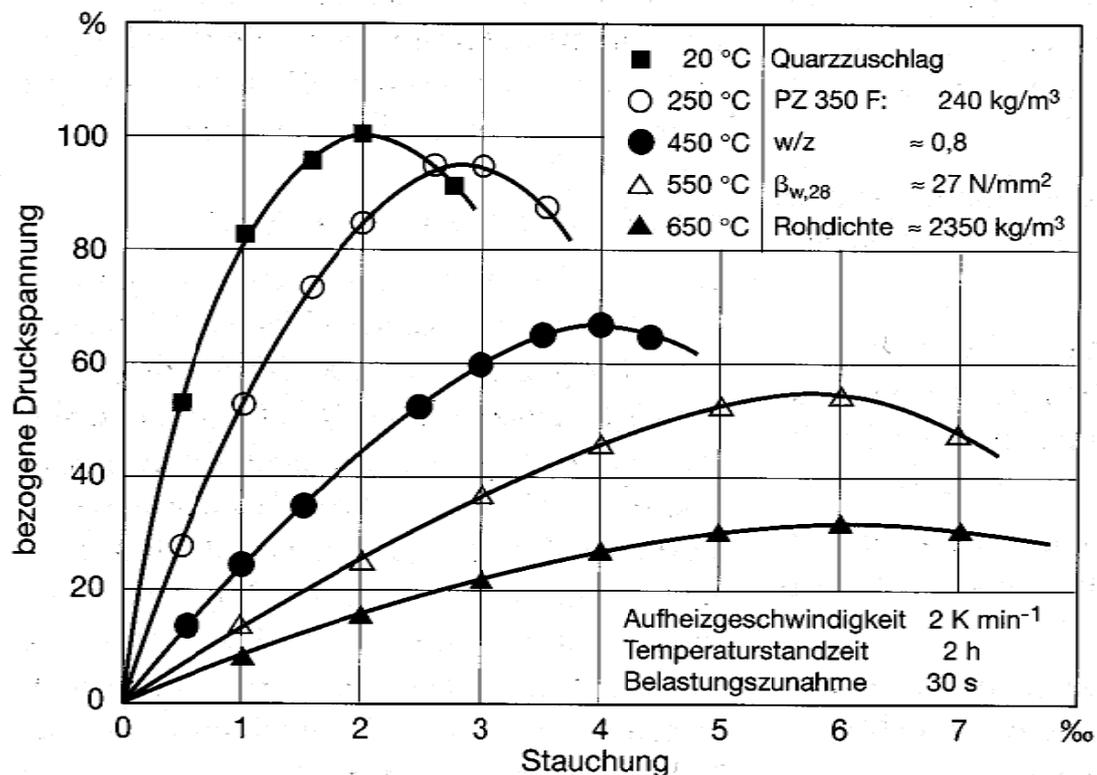


Abbildung 2-14: Spannungs-Dehnungskurven von Normalbeton bei hohen Temperaturen (K. Kordina; R. Meyer-Ottens S.52 [36]).

## 2.6.2 Verhalten von Normalbeton bei Hochtemperaturbelastung

Unter Hochtemperaturbelastung wird im Sinne dieser Arbeit eine Temperaturbelastung des Betons über 300 °C verstanden.

### 2.6.2.1 ZUSCHLAGUMWANDLUNGEN UNTER TEMPERATURBELASTUNG

Bei höheren Temperaturen treten bei vielen Zuschlägen im Beton Mineralumwandlungen und Entwässerungsreaktionen auf, die das Abplatzen begünstigen können. Bei karbonatischen Zuschlägen ist die wichtigste Reaktion eine Entsäuerung des Kalksteins bei etwa 600-900 °C (siehe Tabelle 2-11). Über 1200 °C beginnt das Schmelzen der einzelnen Betonkomponenten. Bei diesem Vorgang treten bei einzelnen Zuschlägen (z.B. Ergussgesteine wie Basalt) Entgasungs- und Bläherscheinungen auf, bei denen eingeschlossene Gase frei werden.

Tabelle 2-11: Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischem und kalzitischem Beton (J. Horvath S.35 [15])

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 $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
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
$\geq 1400$	Zementstein liegt als Schmelze vor

Zur groben Abschätzung der durch diese Vorgänge zerstörten Betonschicht in Normalbeton hat die zurückgezogene DIN 4102-2 aus 1977 das in Abbildung 2-15 gezeigte Diagramm veröffentlicht.

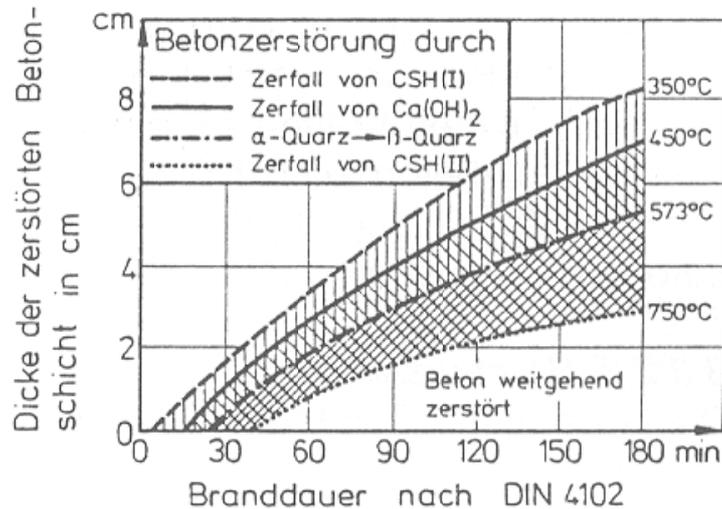


Abbildung 2-15: Zerstörung von Beton unter Brandbeanspruchung mit ETK (A. Häger S.109 [42])

Nach beispielsweise 30 Minuten Brandbelastung durch ETK kann mit einer Betonzerstörung von 1,8 cm gerechnet werden.

### 2.6.2.2 DRUCKFESTIGKEIT, VERFORMUNG UND E-MODUL

Aus der vorangegangenen Abbildung 2-14 ist ebenfalls deutlich ersichtlich, dass bei Temperaturen oberhalb von 600 °C ein deutlicher Rückgang der Druckfestigkeit auftritt. Der E-Modul sinkt stark und die Bruchdehnungen nehmen deutlich zu.

Betone, welche unter einer Vorlast erwärmt werden, erreichen vergleichsweise höhere Festigkeitswerte als unbelastete (siehe Abbildung 2-16).

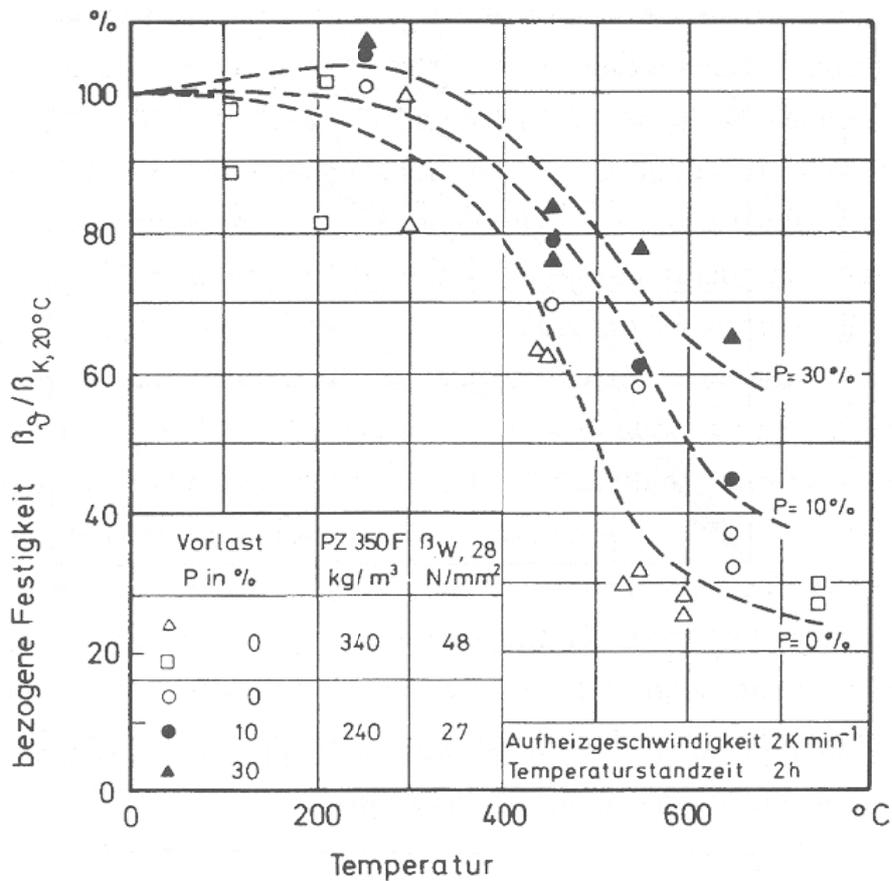


Abbildung 2-16: Bezogene Hochtemperaturfestigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei verschiedenen Vorlasten (K. Kordina; R. Meyer-Ottens S.54 [36]).

Die verwendete Zuschlagsart und die Betongüteklasse (bis zur Betongüte B55) sind in diesem Zusammenhang nicht wesentlich. Allgemein ist zu sagen, dass Betone ohne Quarzzuschläge eine geringfügig niedrigere Wärmeleitung und Wärmeausdehnung besitzen als Betone mit Quarzzuschlägen und deshalb ein etwas besseres Brandverhalten aufweisen.

Durch das Zusammenwirken von Kriechen, thermischer Dehnung und Stauchung wird ein Betonkörper bei der Erwärmung verformt. Die Gesamtverformung wird nicht nur durch die Haupteinflussgrößen Belastung und Temperatur beeinflusst, sondern auch durch die Zuschlagsart und Betonfeuchte (U. Schneider, C. Lebeda S.120 [43]).

In Abbildung 2-17 ist das Verformungsverhalten eines Normalbetons bei einer instationären Wärmebeanspruchung unter bestimmten Vorlasten dargestellt.

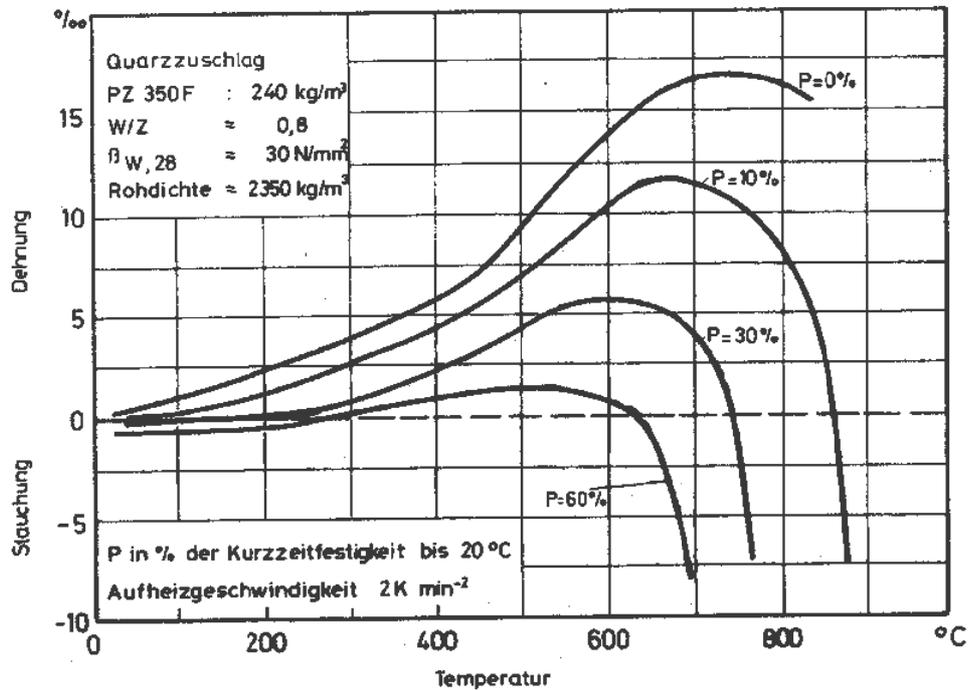


Abbildung 2-17: Verformung einachsial belasteter Betonproben aus Normalbeton bei instationärer Wärmebeanspruchung (U. Schneider, C. Lebeda S.119 [43]).

In obiger Abbildung ist ersichtlich, dass die Dehnung eines unbelasteten Normalbetons über 15 ‰ bei Wärmebelastung betragen kann. Weiters kann man feststellen, dass je größer die Vorbelastung ist, die Dehnungen geringere Werte erreichen und früher wieder abnehmen. Für diese Arbeit ist jedoch nur der Bereich ohne Vorbelastung von Relevanz, da nur unbelastete Probekörper untersucht wurden.

Der Elastizitätsmodul von Betonen verhält sich analog zu den Festigkeiten (s. Abbildung 2-18). Die Betongüte ist ebenfalls praktisch ohne Einfluss, allerdings erfolgt ein Rückgang der Elastizität auch schon bei kleineren Temperaturerhöhungen, d.h. die Verformungen brandbeanspruchter Betonbauteile nehmen schon oberhalb von 200 °C deutlich zu (U. Schneider S.153 [3]).

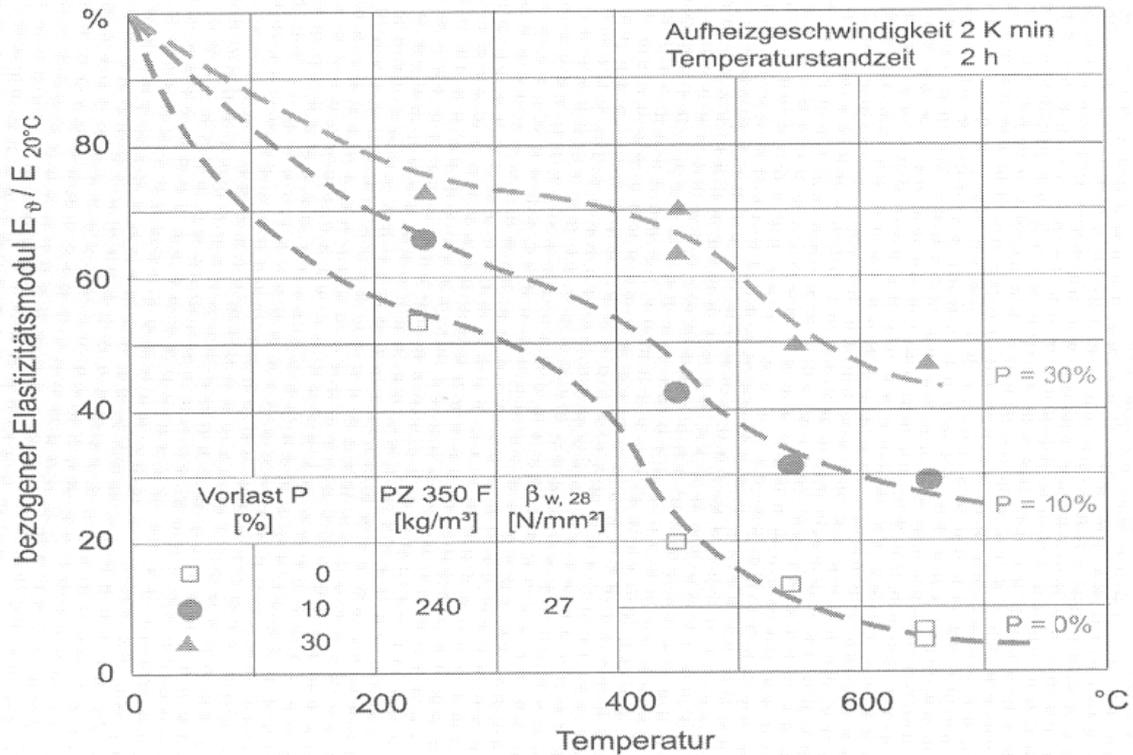


Abbildung 2-18: Bezogener Hochtemperatur-E-Modul von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei verschiedenen Vorlasten während der Aufheizung der Betone (U.Schneider; J. Horvath S.300 [1])

### 2.6.3 Temperaturverteilung in einseitig wärmebeanspruchten Betonbauteilem

In dieser Arbeit ist die Kenntnis der Temperaturverteilung, vor allem für die Abschätzung des Abplatzzeitpunktes der Betonproben und der erwarteten Maximaldrücke bei bestimmten Temperaturen, von Wichtigkeit.

Deshalb sind in Abbildung 2-19 die Temperaturverläufe mit ETK in einem 100 bzw. 150 mm dicken Bauteil dargestellt. Darin ist ersichtlich dass die Plattendicke über 10 cm praktisch keinen Einfluss auf die Temperaturverteilung hat (U. Schneider S.174 [3]). Wie die in Kapitel 3 angeführten Untersuchungen zeigen baut sich der maximale Porendruck und damit Abplatzungen vor allem in einem Temperaturbereich von 180 bis 250 °C auf. Dieser Bereich ist in 20 mm Tiefe nach einer Zeit von 30 Minuten bereits weit überschritten.

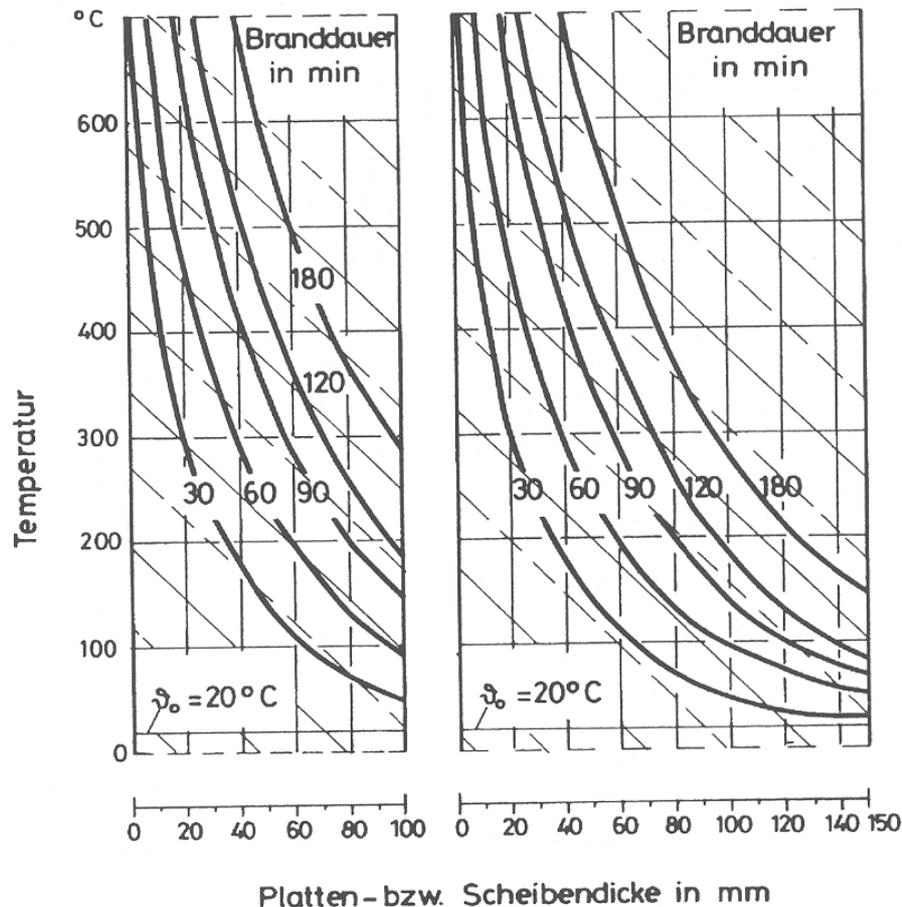


Abbildung 2-19: Temperaturverteilung in einseitig nach ETK belasteter Platten bzw. Scheiben aus Normalbeton (U. Schneider S.173 [3])

## 2.6.4 Abplatzungen zufolge Brandbelastung

### 2.6.4.1 ALLGEMEINES

Abplatzungen im Sinne dieser Arbeit sind Betonabsprengungen infolge einer Brandbeanspruchung (Verein Deutscher Zementwerke VDZ S.437 [7]).

Durch Abplatzungen an Betontragwerken kann ein Bauteil wesentlich geschädigt werden. Einerseits bewirken Abplatzungen an Stahlbetonbauteilen eine Verringerung der Betondeckung und damit eine Verringerung des Schutzes der Bewehrung gegen die hohen Temperaturen. Andererseits kann es durch Abplatzungen zu einer massiven Querschnittsschwächung kommen, die bis zum Versagen des Bauteils führen kann.

Folgende Parameter haben auf das Abplatzverhalten einen wesentlichen Einfluss:

- Feuchtegehalt des Betons
- Maximale Brandtemperatur
- Geschwindigkeit des Temperaturanstieges
- Festigkeit und Dichtigkeit des Betons
- Porenvolumen und mittlere Porengröße
- Mineralische Zusammensetzung des Zuschlages
- Bauteilgeometrie
- Bewehrungsanordnung
- Spannungsverteilung im Bauteil.

Grundsätzlich werden in der Literatur vier Arten von Betonabplatzungen unterschieden:

- Zuschlagstoff-Abplatzungen (Aggregate Spalling)
- Abfallen von Betonschichten (Sloughing off)
- Bei Spritzbeton Soft Spalling
- Explosionsartige Abplatzungen ( Explosive Spalling).

#### **2.6.4.2 ZUSCHLAGSTOFF ABPLATZUNGEN (AGGREGATE SPALLING)**

Unter **Zuschlagstoff Abplatzungen** wird das Zerplatzen oder Zersplittern von Zuschlägen infolge physikalischer und chemischer Veränderungen unter hohen Temperaturen verstanden (*K. Kordina, C. Meyer-Ottens* S.82 [36]). Physikalische Veränderungen sind beispielsweise Volumenänderungen, die bei den Phasenübergängen durch Kristallbildungen etc. auftreten können. Bei chemischen Veränderungen wird meistens Wasser freigesetzt, das bei hohen Temperaturen entsteht und plötzlich entweicht. Dadurch kommt es zu einer Zermürbung der Zuschläge und damit des Betons. Eine Auflistung von Zuschlagstoffen die Abplatzen können, sowie deren chemische Zusammensetzung, die Ursache der Abplatzung und der Temperaturbereich in dem dies geschehen kann ist in Tabelle 2-12 angeführt.

Tabelle 2-12: Zuschlagstoffe, die bei Temperaturbelastung eventuell abplatzen können (*J. Horvath* S.35 [15])

	Zuschlagstoff-Art	Chemische Zusammensetzung	Ursachen für Abplatzungen	Temperaturbereich bei Abplatzungen °C
1	Sandsteine spezieller Zusammensetzung	SiO <sub>2</sub> mit Einschlüssen von Fe OOH	H <sub>2</sub> O	260 - 350
2	Sandsteine spezieller Zusammensetzung	SiO <sub>2</sub> mit Einschlüssen von Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , C u. CaCO <sub>3</sub>	CO, CO <sub>2</sub>	≥900
3	Feuersteine	SiO <sub>2</sub> mit opalartig gebundenem Wasser, C und CaCO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O CO, CO <sub>2</sub>	≥150 ≥900
4	Verwitterte Feldspäte	Al <sub>4</sub> OH <sub>8</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (Kaolinit)	H <sub>2</sub> O	390 - 450
5	Verwitterte Gneise	u.a. Al <sub>4</sub> OH <sub>8</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (Kaolinit)	H <sub>2</sub> O Schichtung	390 - 450
6	Baryt	BaSO <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	≥1100

### 2.6.4.3 ABFALLEN VON BETONSCHICHTEN (SLOUGHING OFF)

Unter **Abfallen von Betonschichten** wird das Abfallen von kleineren oder größeren Betonschichten oder –teilen nach längerer Brandbeanspruchung verstanden, das durch die Zermürbung und Rissbildung infolge Brandbeanspruchung beeinflusst wird und besonders bei zunehmenden Verformungen auftritt.

Die Ursachen für das Abfallen von Betonschichten sind:

- Eigenspannungen infolge unterschiedlicher Dehnungen bei ungleichmäßiger Temperaturverteilung über einen Querschnitt (siehe Abbildung 2-20)
- Bauteilverformungen
- Zwängungsspannungen infolge unterschiedlicher Dehnung zwischen Beton und Bewehrungsstäben
- Zermürbung des Betons infolge physikalischer und chemischer Veränderungen (*J. Horvath et al.* S.28 f. [48]).

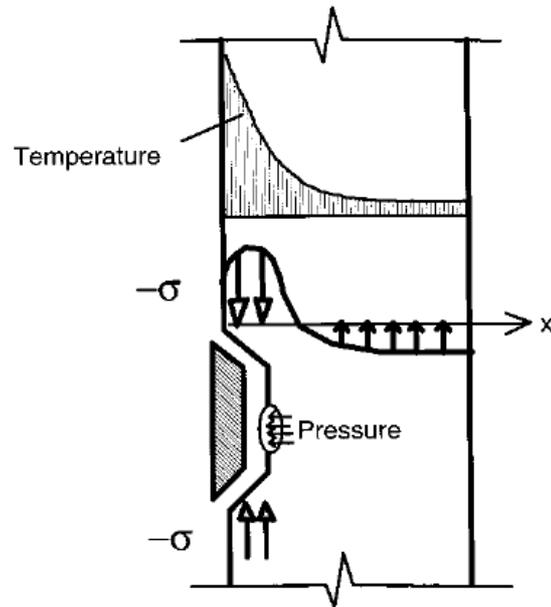


Abbildung 2-20: Spannungsverteilung infolge unterschiedlicher Dehnungen (F. Ulm, et al. S.273 [24])

#### 2.6.4.4 SOFT SPALLING BEI SPRITZBETON

Bei **Spritzbeton Soft Spalling** handelt es sich um einen Spezialfall des Abfallens von Betonschichten. Diese Art der thermischen Betonschädigung tritt primär bei Spritzbeton dann auf, wenn im Betongefüge markante Permeabilitätsänderungen vorhanden sind. Der Wasserdampf diffundiert durch die Zone mit geringerer Permeabilität hindurch und staut an der Grenzfläche zur dichteren Zone auf. Da dieser Grenzflächenbereich in der Regel auch eine geringere Zugfestigkeit aufweist, kommt es hier bevorzugt zum Abfallen der thermisch beanspruchten Betonschicht.

#### 2.6.4.5 EXPLOSIONSARTIGE ABPLATZUNGEN (EXPLOSIVE SPALLING)

**Explosionsartige Abplatzungen** sind die häufigste und gefährlichste Form von Abplatzungen.

Hauptursache dafür sind **Zugspannungen**, die durch die Bildung von Dampfdrücken entstehen. Diese können beispielsweise beim Ausströmen von Wasserdampf durch Reibung an den Porenwänden im temperaturbeanspruchten Beton entstehen. Schon bei einer Aufheizung auf 300 °C können im Beton Zugspannungen von 8 N/mm<sup>2</sup> entstehen, die sich bei

einer weiteren Steigerung der Temperatur auf 350 °C verdoppeln können, wobei die Zugfestigkeit des Betons bei weitem überschritten werden kann (H. Höfer S. 65 [20]).

Explosionsartige Abplatzungen traten bei Versuchen und Bränden im Allgemeinen nur bei Feuchtigkeitsgehalten > 2 Masse-Prozent auf (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton S.74 [25]).

Unter diesem Prozentsatz treten auch unter ungünstigen Prüfungsbedingungen keine Abplatzungen auf, jedoch liegt der Feuchtigkeitsgehalt in der Praxis praktisch immer darüber.

Eine weitere Ursache für explosionsartige Abplatzungen können Temperatur-Eigen- und Zwängungsspannungen im Betonquerschnitt sein, die bei jeder Brandbelastung entstehen.

Diese entstehen, da sich der Zuschlag mit steigender Temperatur ausdehnt (Wärmedehnzahl  $\alpha_T=5 \cdot 10^{-6}$  bis  $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6}$ ), der Zementstein infolge Trocknung und Dehydration jedoch nach einer gewissen Anfangsdehnung schrumpft (J. Horvath S.37 [15]). Dieser Effekt ist deutlich in dem Diagramm in Abbildung 2-21 ersichtlich.

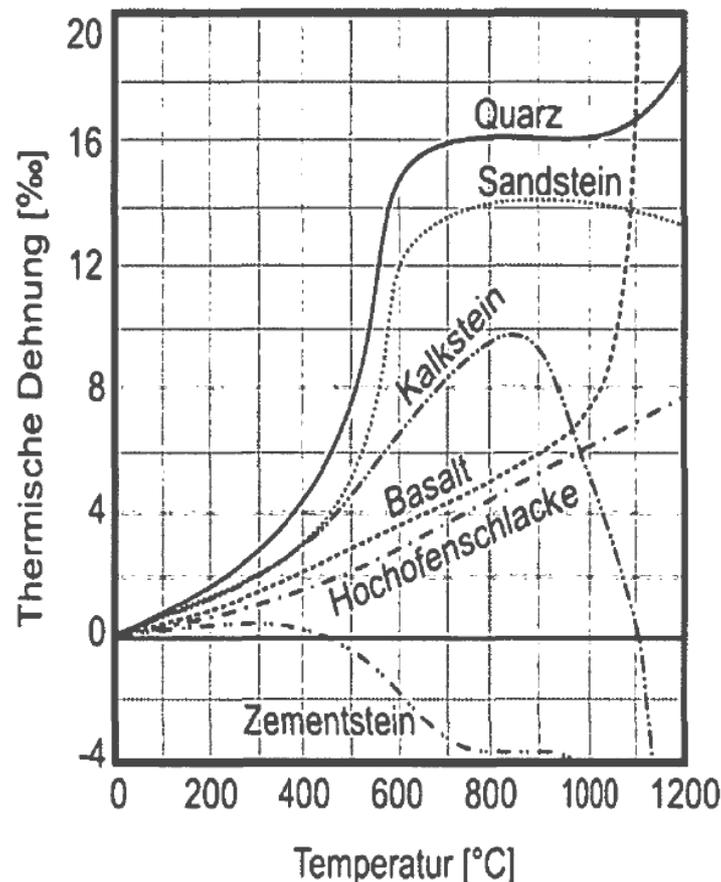


Abbildung 2-21: Thermische Dehnungen von Zuschlägen und Zementstein in Abhängigkeit der Temperatur (U. Schneider, J. Horvath S. 30 [23])

### **Auswirkungen explosionsartiger Abplatzungen**

- Durch explosionsartige Abplatzungen wird die für die Standsicherheit wesentliche Bewehrung über einen Teilbereich freigelegt. Infolge der schnelleren Erwärmung der Stahlquerschnitte können dann Tragfähigkeit und Raumabschluss verloren gehen.
- Durch explosionsartige Abplatzungen wird der tragende Betonquerschnitt so stark reduziert, dass die ihm zugeordneten Kräfte nicht mehr übertragen werden können; Tragfähigkeit und Raumabschluss können dann ebenfalls verloren gehen.
- Durch explosionsartige Abplatzungen entstehen in raumabschließenden Bauteilen Löcher, die Tragfähigkeit bleibt jedoch erhalten. Im Sinne von ÖNORM B 3800 liegt dann ebenfalls Bauteilversagen vor, da die weitere Feuerausbreitung durch solche Löcher möglich ist. Dies geschieht meist nur bei dünnen Bauteilen.

### **2.6.5 Thermohydraulische Prozesse - Porendruck**

Unter hoher Temperaturbelastung desorbiert das physikalisch gebundene Wasser und ein Teil des in den Gelporen gebundenen Wassers sowie Kristallwasser aus den Zuschlägen. Während ein Teil dieses Wasserdampfes durch die Poren des Betons entweicht, diffundiert der andere Teil tiefer in den Betonkörper bis er dort in den kälteren Bereichen kondensiert. Dadurch kommt es in dieser Zone nach einer gewissen Zeit zu einer Porensättigung, die eine Barriere für die weitere Diffusion ins Bauteilinnere darstellt. Der Wasserdampf kann deshalb nur noch nach außen in Richtung der heißen Zone abströmen. Der Dampfdruck erhöht sich deshalb an dieser gesättigten Zone immer mehr bis die Zugspannung des Betons überschritten wird und es zu einer explosionsartigen Abplatzung kommt. Dabei treten in der Regel bei einseitig erwärmten Bauteilen schalenförmige Abplatzungen auf. Diese Vorgänge sind schematisch in Abbildung 2-22 grafisch dargestellt.

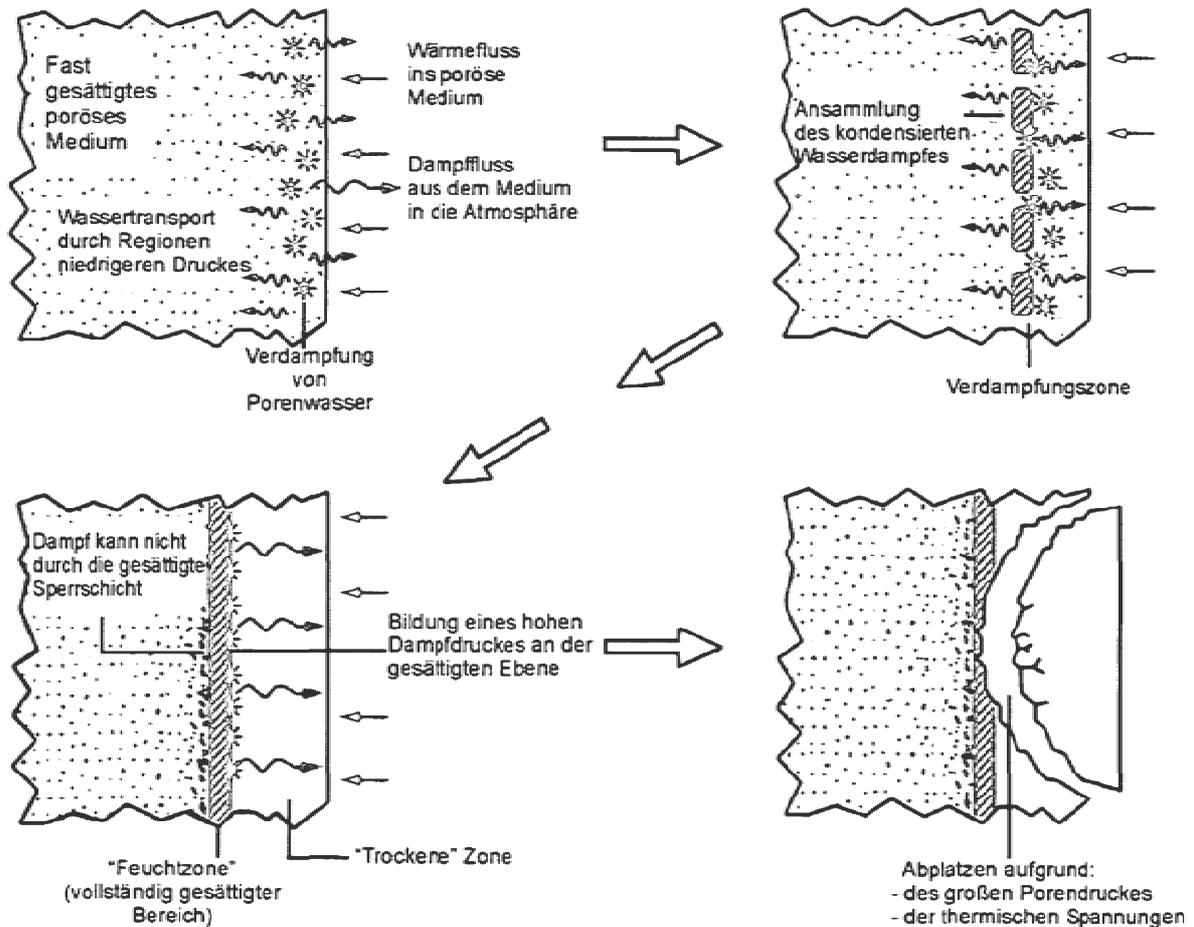


Abbildung 2-22: Schematische Darstellung der Entstehung von Abplatzungen (U. Schneider; J. Horvath, F. Dehn S.284 [22])

Dabei bilden sich 3 Zonen aus:

- eine getrocknete bzw. dehydrierte Zone
- eine wassergesättigte Zone
- und eine unveränderte Zone.

In Abbildung 2-23 sind die Zonen für Normalbeton und hochfestem Beton mit den dazugehörigen Temperatur-, Dampfdruck-, und Feuchtigkeitsverläufen dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass der Abstand der wassergesättigten Ebene zur beheizten Oberfläche bei hochfestem Beton geringer ist als bei Normalbeton. Das beruht darauf, dass hochfeste Betone eine geringere Permeabilität und Porosität aufweisen.

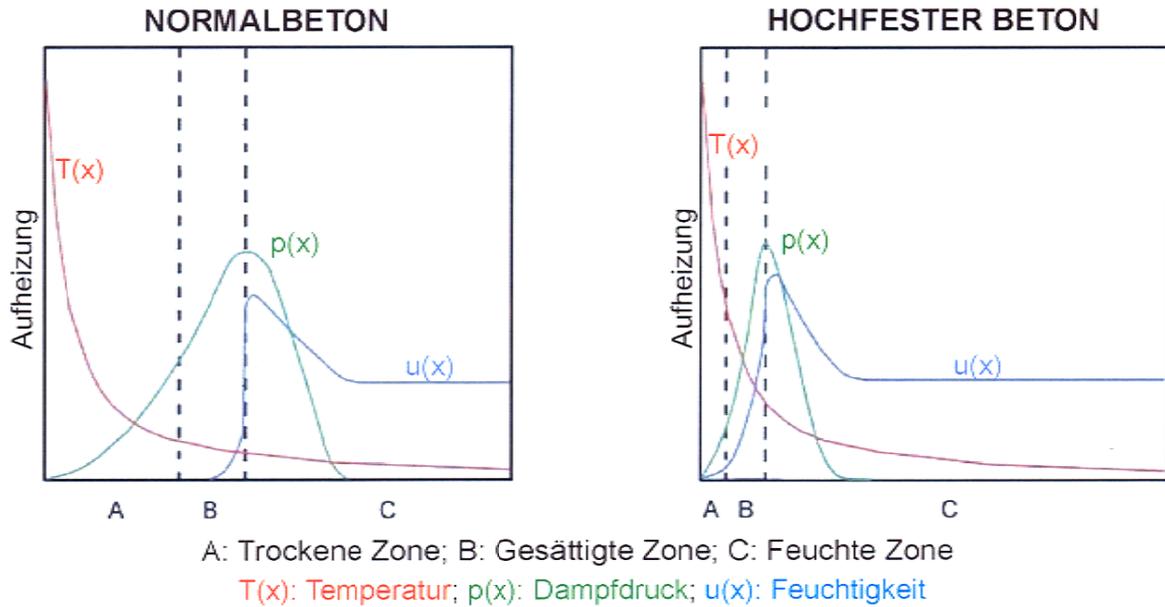


Abbildung 2-23: Temperatur-, Dampfdruck- und Feuchtigkeitsverteilung von Normalbeton und hochfestem Beton unter einseitiger Brandbeanspruchung (U. Schneider; J. Horvath, F. Dehn S. 285 [22])

Die zu erwartende Reihenfolge von Abplatzungen an einer Stelle ist in Abbildung 2-24 dargestellt.

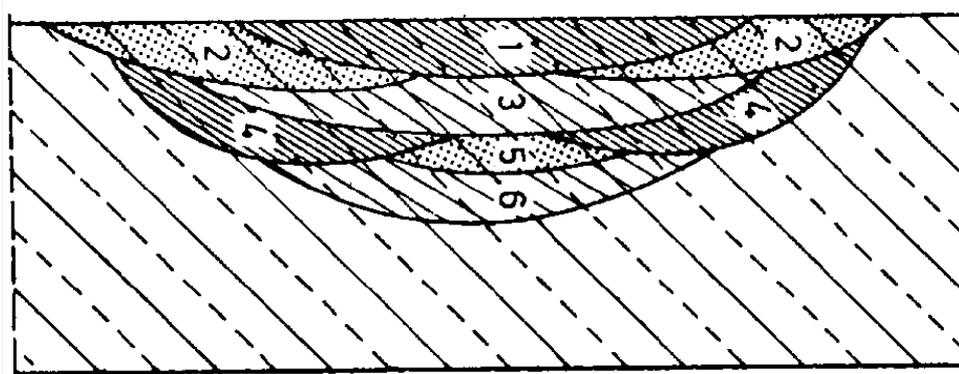


Abbildung 2-24; Abfolge bei Betonabplatzungen (U. Schneider; J. Horvath, F. Dehn S. 285 [22])

Wenn man den Gesamtdruck einer Pore betrachten will, so ergibt sich dieser aus der Summe der einzelnen Partialdrücke von Wasser, Luft und eventuell von Fasern.

$$P_{\text{tot}(T)} = P_{W(T)} + P_{L(T)} + [P_{F(T)}]$$

Aus Abbildung 2-25 ist ersichtlich, dass bereits bei einer Temperatur von ca. 150 °C der Dampfdruck  $P_{W(T)}$  in einen Bereich steigt, wo die Zugfestigkeit von Normalbeton erreicht wird. Bei einer weiteren Erhöhung der Temperatur auf 300 °C können Zugspannungen bis 8

N/mm<sup>2</sup> entstehen, die der Zugfestigkeit von UHPC entspricht. Dieser Wert kann sich bei einer weiteren Temperatursteigerung auf 350 °C noch einmal verdoppeln.

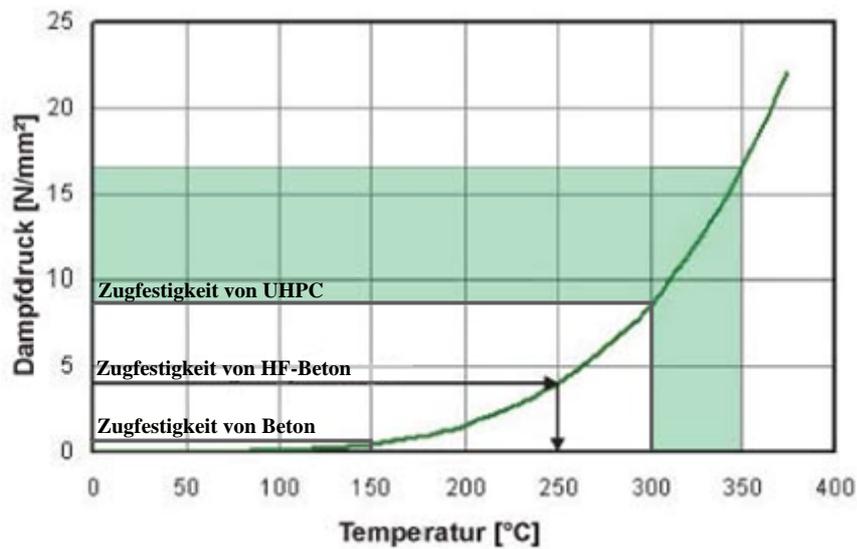


Abbildung 2-25: Dampfdruck-Kurve (J. Horvath S.37 [15]).

Die folgende Abbildung 2-26 zeigt die Temperatur- und Wasserdampfdruckverteilung in einem einseitig brandbeanspruchten Betonbauteil und die daraus folgende theoretische Zugkraft R. Beim Ausströmen des Wasserdampfes von der Fläche CD zur Oberfläche AB entstehen an den Kapillarporen Wandreibungskräfte, die aufsummiert zu Zugspannungen im Beton führen.

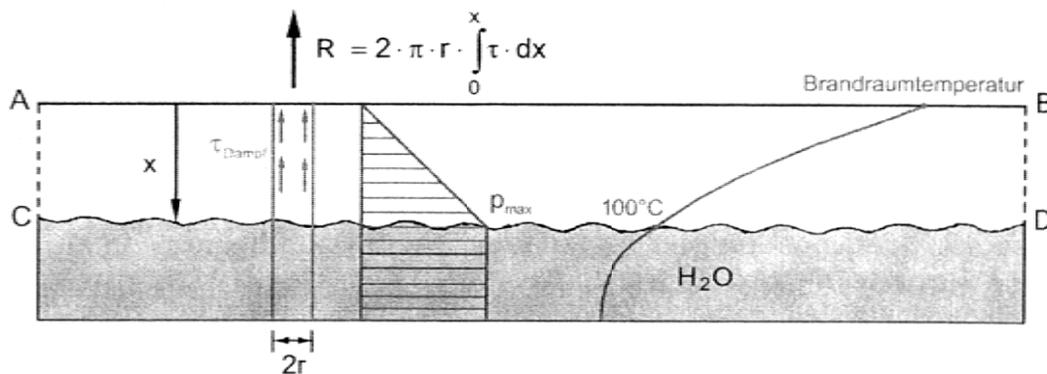


Abbildung 2-26: Schematische Darstellung des Temperatur- und Wasserdampfdruckverlaufes in einem Betonkörper unter Brandbeanspruchung (C. Drexler S.83[21])

## 2.7 Temperatur-Zeitkurvenkurven

### Allgemeines

Um die Brandeinwirkung auf Bauteile oder Bauten erfassen zu können, wurden Temperatur-Zeitkurven entwickelt. Auf Grundlage von gesamtheitlichen Sicherheitskonzepten und Störfallanalysen wurden realistische Brandfälle betrachtet und daraus die Temperatur-Zeitkurven abgeleitet. Je nach Anforderungen und akzeptiertem Risiko (nicht abgedecktes Restrisiko) wird die Dauer der Temperaturbeanspruchung festgelegt.

### Arten

Die Verläufe der in Europa gebräuchlichen Temperatur-Zeitkurven sind in Abbildung 2-27 ersichtlich.

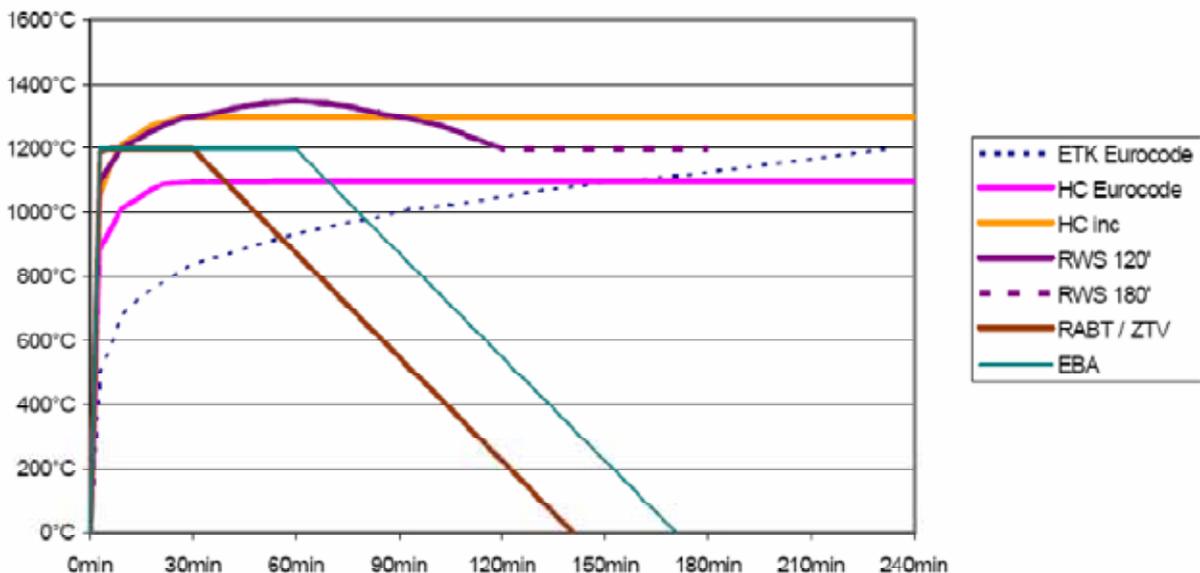


Abbildung 2-27: Europäische Temperatur-Zeitkurven (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik S.4 [11])

- Die **Hydrocarbonkurven HC** und **HC<sub>inc</sub>** wurden für Kohlenwasserstoffbrände von Industrie- und Off-shore-Anlagen entworfen.

- Die **RWS-Kurve** wurde für Straßentunnel konzipiert, wobei ein Unfall mit einem Tanklastfahrzeug mit 50 m<sup>3</sup> Benzininhalt unterstellt wurde.
- Die **RABT-** oder auch ZTV-Kurve wurde für Straßentunnel entwickelt. Das Unfall-Brandszenario ist nicht genau definiert, die Kurve beschreibt im Prinzip jedoch am ehestens einen Flüssigkeitsbrand von 10 to (12,5 m<sup>3</sup>) Flüssigkeit.
- Die **EBA-Kurve** gilt für Eisenbahntunnel. Sie basiert auf der RABT-Kurve und wurde in der Grundkonzeption nur für den Brand eines Personenwaggons ohne Brandübersprung ausgelegt (*Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik* S.3 [11]).
- Die **Einheitstemperaturkurve ETK** wird vor allem zur Klassifikation von Bauteilen im Hochbau verwendet, aber auch beispielsweise für die Bemessung von Straßentunnel laut RVS.

Verschiedene Temperaturgradienten der einzelnen Temperatur-Zeitkurven sind in Tabelle 2-13 angeführt.

Tabelle 2-13: Gradienten von Brandkurven (*J. Horvath* S.12 [15])

Zeit [min]	ETK	ETK Gradient [°C/min]	RWS	RWS Gradient [°C/min]	RABT	RABT-Gradient [°C/min]	Hydro-carbon	HC Gradient [°C/min]
0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0
0,5	261,1	482,2	114,4	228,8	120,0	240,0	572,3	1104,7
1,0	349,2	176,1	228,8	228,8	240,0	240,0	745,4	346,2
1,5	404,3	110,1	343,2	228,8	360,0	240,0	810,6	130,2
2,0	444,5	80,3	457,6	228,8	480,0	240,0	844,1	67,0
2,5	476,1	63,3	572,0	228,8	600,0	240,0	867,5	46,7
3,0	502,2	52,2	686,4	228,8	720,0	240,0	886,9	38,8
3,5	524,5	44,4	800,8	228,8	840,0	240,0	904,2	34,5
4,0	543,8	38,7	915,2	228,8	960,0	240,0	920,0	31,4
4,5	561,0	34,2	1029,6	228,8	1080,0	240,0	934,4	28,8
5,0	576,4	30,7	1144,0	228,8	1200,0	240,0	947,7	26,5

### Einheitstemperaturkurve ETK

Zur Durchführung der Brandversuche in der hier vorliegenden Arbeit wurde die Einheitstemperaturkurve ETK nach ÖNORM EN 1363-1 herangezogen. Die ETK-Kurve

wurde in den 20-iger Jahren des 20. Jahrhunderts aus den Erfahrungen von Raumbränden für Hochbauten entwickelt. Sie basiert auf einem Feststoffbrand, ohne Entzündungs- und Schwelbrandphase. Sie beschreibt die Temperaturentwicklung bei einem vollentwickelten Brand dem unendlich viel Brennstoff zur Verfügung steht. Die ETK wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$T = 345 \times \log_{10}(8t+1) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Mit:

T... mittlere Ofentemperatur

t... Versuchszeit in Minuten

Umgebungstemperatur 20 °C

In Tabelle 2-14 sind die Temperaturwerte lt. ETK in 5-Minuten-Abständen angeführt.

Tabelle 2-14: Temperaturwerte der ETK

t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)
0	20	95	1014,1
5	576,4	100	1021,8
10	678,4	105	1029,1
15	738,6	110	1036,0
20	781,4	115	1042,7
25	814,6	120	1049,0
30	841,8	125	1055,1
35	864,8	130	1061,0
40	884,7	135	1066,7
45	902,3	140	1072,1
50	918,1	145	1077,4
55	932,3	150	1082,4
60	945,3	155	1087,4
65	957,3	160	1092,1
70	968,4	165	1096,7
75	978,7	170	1101,2
80	988,4	175	1105,5
85	997,4	180	1109,7
90	1006,0		

### Zulässige Abweichungen:

Die zulässigen Abweichungen dürfen lt. ÖNORM EN 1363-1 folgende Werte nicht überschreiten:

- a)  $\pm 15 \%$  für  $5 < t \leq 10$  min
- b)  $\pm (15-0,5(t-10)) \%$  für  $10 < t \leq 30$  min
- c)  $\pm (5-0,083(t-30)) \%$  für  $30 < t \leq 60$  min
- d)  $\pm 2,5 \%$  für  $> 60$  min.

Dabei ist:

$$d_e = \frac{A - A_s}{A_s} \times 100$$

$d_e$ ... die prozentuelle Abweichung

$A$ ... die Fläche unterhalb der Einheits-Temperaturzeitkurve

$A_s$ ... die Fläche unterhalb der Einheits-Temperaturzeitkurve

$t$ ... die Zeit, in Minuten (ÖNORM EN 1363-1 S.11 [45])

Die graphische Darstellung der Einheitstemperaturkurve mit den Toleranzbereichen bis zu einer Versuchsdauer von 130 Minuten ist in Abbildung 2-28: Grafische Darstellung ETK mit Toleranzbereichen Abbildung 2-28 gezeigt.

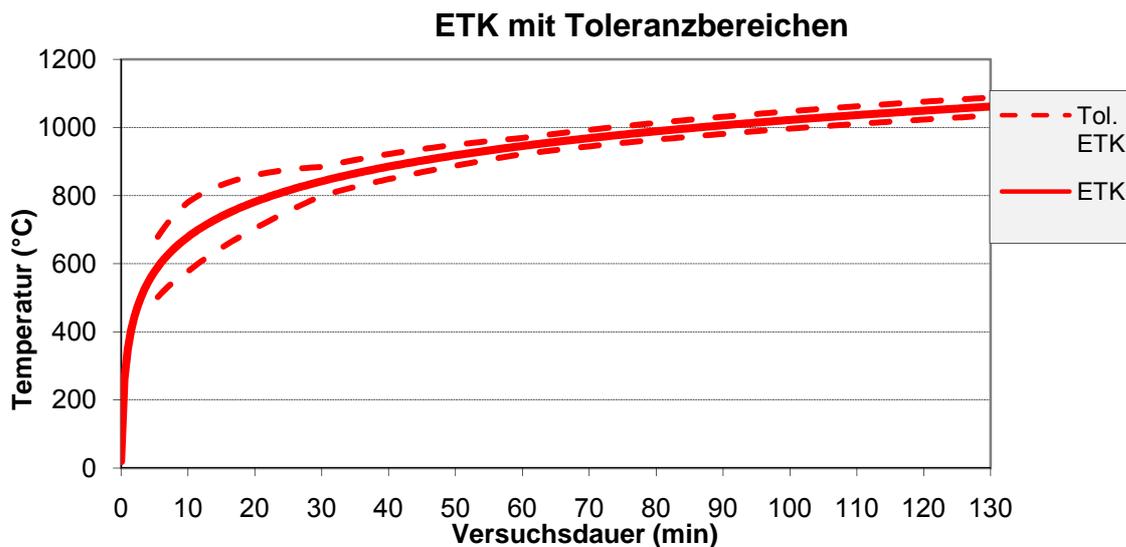


Abbildung 2-28: Grafische Darstellung ETK mit Toleranzbereichen

## 3 Aktuelle Untersuchungen zum Thema Kapillarporendruck von Beton unter Brandbelastung – Stand der Technik

### 3.1 Einführung

Untersuchungen zum Thema Kapillarporendruck in Beton unter Brandbeanspruchung sind in der Fachliteratur sehr selten anzufinden. Unter diesen Untersuchungen gibt es auch oftmals große Unterschiede bei den maximal gemessenen Porendrücken. Die weit auseinanderliegenden Untersuchungsergebnisse weisen darauf hin, dass es auf diesem Gebiet weiterhin einen großen Forschungsbedarf gibt. Im Folgenden sind die Versuchsaufbauten und Ergebnisse einige der bedeutendsten Untersuchungen der letzten Jahre, sowie eine Zusammenstellung anderer Untersuchungsergebnisse angeführt.

### 3.2 Untersuchungen durch das *NIST (National Institute of Standards and Technology, USA)*

#### 3.2.1 Porendruckuntersuchungen an Normal- und hochfestem Beton (2002)

Bei diesen Versuchen wurde der Porendruck an Normalbeton und Hochleistungsbeton gemessen. Dabei wurde der Einfluss durch verschiedene W/B-Werte (0,22 und 0,57), Dosierungen von PP-Fasern (0 bis 3kg/m<sup>3</sup>) und Wärmesteigerungsraten (5°C/min bis 25°C/min) untersucht.

Dazu wurden Probekörper mit verschiedenen Betonrezepturen und den Abmessungen 100 x 200 x 200 mm hergestellt und darin Thermoelemente und Drucksensoren (ähnlich jenen der in Kapitel 3.3 und 3.4 angeführten) in verschiedenen Tiefen einbetoniert. Für die Versuche wurden 5 Seiten der Probekörper gedämmt, um die Wärme nur einseitig auf der freien Seite in den Betonkörper einzutragen. Eine schematische Zeichnung des Probekörpers und der Messanordnung ist in Abbildung 3-1 zu sehen.

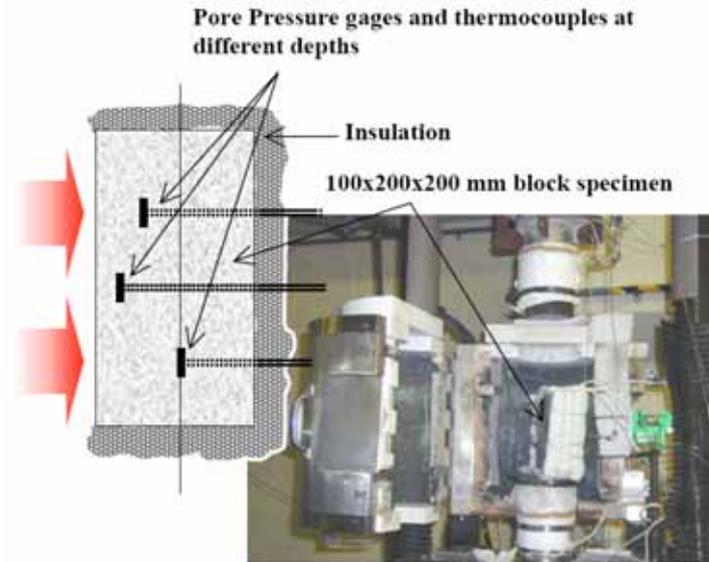


Abbildung 3-1: Schematische Ansicht des Probekörpers und Messanordnung (L. T. Phan, S. 4 [30])

Die Erwärmung der Proben wurde auf bis zu 600 °C durchgeführt. Abbildung 3-2 zeigt die Entwicklung des Porendruckes in einem hochfesten Beton bei einer langsamen Erwärmung von 5°C/min in den Tiefen von 25 und 50 mm.

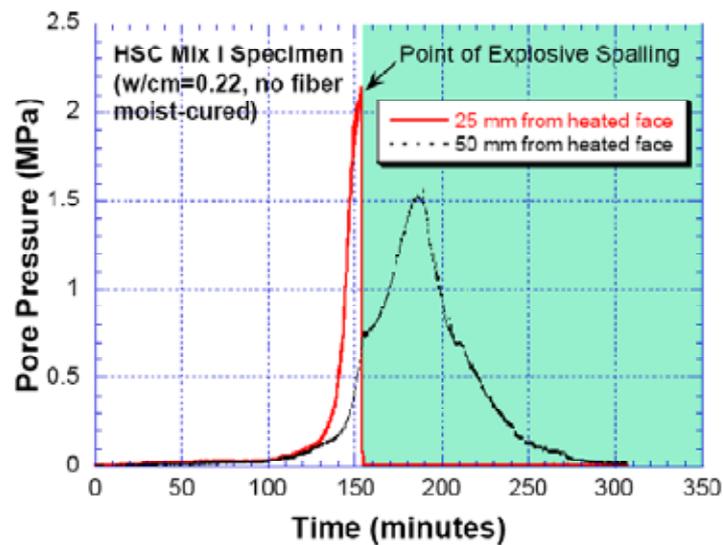


Abbildung 3-2: Porendruckentwicklung in verschiedenen Tiefen (L. T. Phan, S. 7 [30])

Dabei wurde in 25 mm Tiefe nach ca. 155 Minuten ein Druck von 2,1 MPa (21 bar) festgestellt. Bemerkenswert daran ist, dass der Druck nach etwa 2 Stunden erst ungefähr 1 bar

betragen hat und sich dann markant bis zum Zeitpunkt des Abplatzens nach 155 Minuten erhöhte.

In der folgenden Abbildung 3-3 sind die Porendruckergebnisse in 25 mm Tiefe mit verschiedenen Mischungen abgebildet.

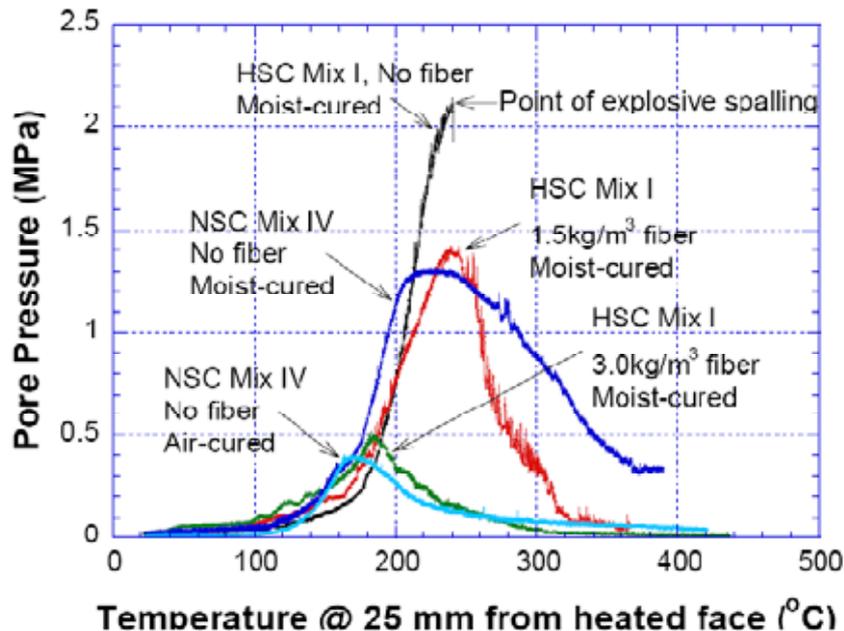


Abbildung 3-3: Porendruck in 25 mm Tiefe in verschiedenen Probekörpern (L. T. Phan S. 7 [30])

Der höchste gemessene Wert für Normalbeton (blaue Linie) lag dabei bei 1,3 MPa (13 bar). Diese Probe wurde im Wasserbad gelagert und wies einen deutlich größeren Druck wie die mit selber Rezeptur hergestellte luftgetrocknete Probe (türkise Linie) mit 0,4 MPa auf. Der Temperaturbereich bei dem sich die höchsten Drücke einstellten lag zwischen 170 und 250 °C. Bei den hochfesten Proben mit HSC Mix I ist deutlich der Einfluss von PP-Fasern auf den entstehenden Porendruck ersichtlich. Während bei der Probe ohne Fasern der Druck auf 2,1 MPa steigt ist es bei einer Zugabe von 3 kg/m<sup>3</sup> Fasern nur noch 0,5 MPa.

### 3.2.2 Porendruckuntersuchungen an Zementmörtel (1997)

Das National Institute of Standards and Technology führte im Jahr 1997 umfangreiche Versuche zu Porendruck in Zementmörtel und die rechnerische Vorhersage der entstehenden Drücke durch. Dazu wurden Probekörper in Stahlzylindern hergestellt und mit Messeinrichtungen für Temperatur und Druck versehen (siehe Abbildung 3-4).

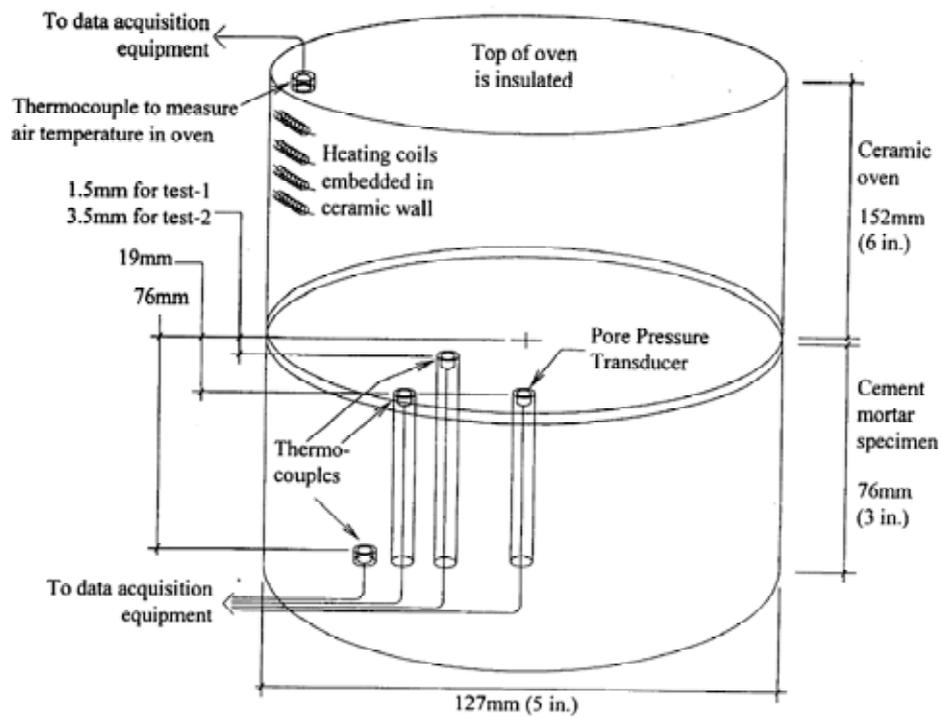


Abbildung 3-4: Messeinrichtung Zementmörtel (NIST S.137 [31])

Die Druckmessungen wurden 19 mm unter der erwärmten Oberfläche durchgeführt. Die Probe wurde auf knapp 800 °C erhitzt, wobei nach 580 Sekunden die Maximaltemperatur erreicht wurde (siehe Abbildung 3-5).

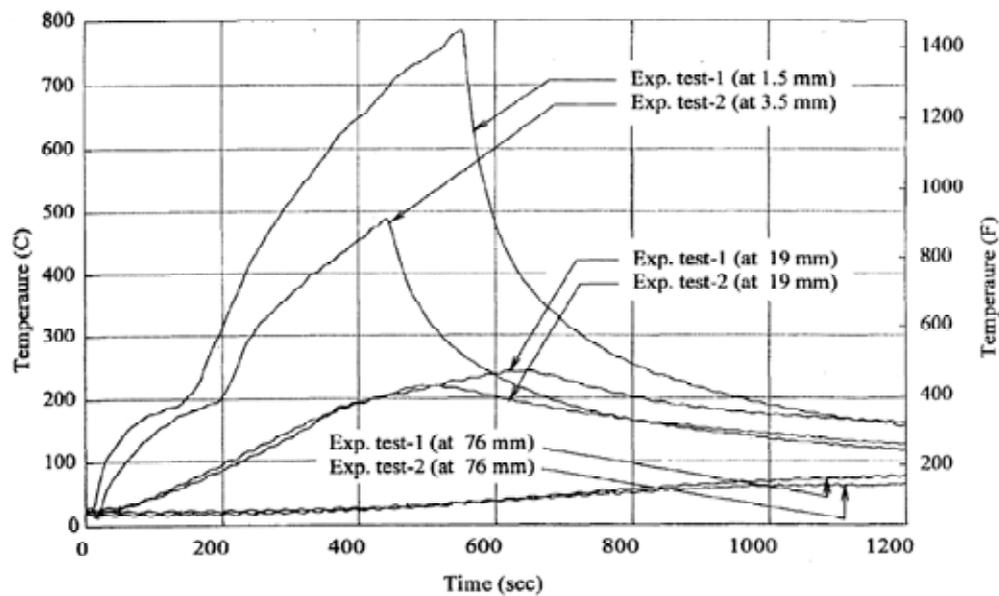


Abbildung 3-5: Temperaturverlauf während Porendruckversuch (NIST S.138 [31])

Nach 580 Sekunden kommt es an der Oberfläche zu den ersten Abplatzungen während die Temperatur an den Messstellen in 19 mm Tiefe weiter steigen. Als Parallele zu Kapitel 3.2.1 dieser Arbeit beträgt die Temperatur bei der die maximalen Drücke auftreten wiederum etwa im selben Bereich bei 220 bis 250 °C. Der Druckverlauf beider Messungen 19 mm unter der Oberfläche wird in Abbildung 3-6 gezeigt.

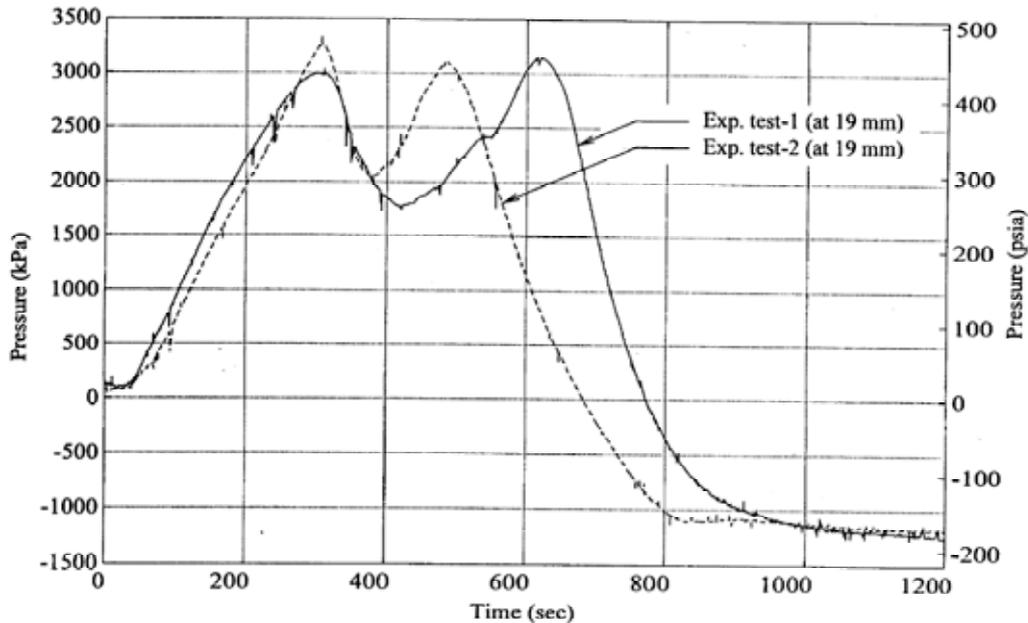


Abbildung 3-6: Auftretende Porendrücke im Zementmörtel (NIST S.139 [31])

Dabei kam es bereits nach wenigen Sekunden zu einem beinahe linearen Anstieg des Druckes und nach einem kurzfristigen Absinken zu einem erneuten Anstieg bis zum Abplatzen des Zementmörtels. Als Maximalwert wurde ein Druck von von in etwa 3,3 MPa (33 bar) erreicht.

### 3.3 Untersuchungen durch das *CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment, Fra)* 1999-2002

Bei diesen Untersuchungen wurden Probekörper aus Normalbeton und hochfestem Beton mit den Abmessungen 30 x 30 x 12 cm hergestellt. Der Betonrezeptur wurden unterschiedliche Mengen von PP-Fasern beigelegt (0 kg/m<sup>3</sup> bis 3 kg/m<sup>3</sup>). Ziel dieser Arbeit war es, die Abhängigkeit des Kapillarporendruckes von der Betonart, Faserbeimengung und Messtiefe zu untersuchen. In Abbildung 3-7 ist der dafür entwickelte Messaufbau ersichtlich.

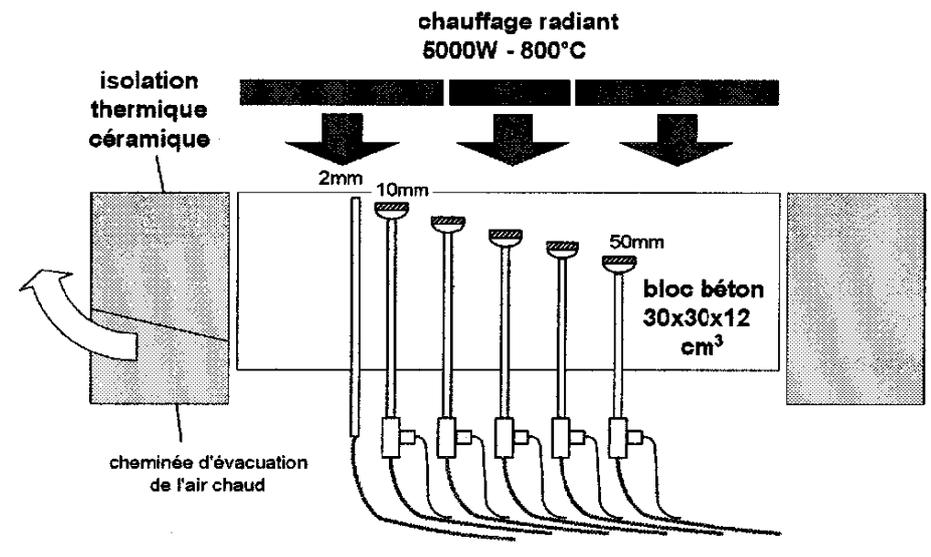


Abbildung 3-7: Messaufbau Versuche *CSTB* (P.Kalifa et al. S.8 [35])

In die Proben wurden 5 Druckmesssonden mit integrierten Thermoelementen in 10, 20, 30, 40 und 50 mm Tiefe einbetoniert. Diese Sonden bestanden aus einer gesinterten, porösen Metallplatte mit 12 mm Durchmesser und 1 mm Dicke, die in einen Stahlteller eingeklemmt war. An dessen Rückseite wurde ein Rohr angeschweißt mit einem Innendurchmesser von 1,6 mm. Darin wurde ein rundes Thermoelement mit Durchmesser 1,5 mm eingeführt. Die Druckmessung erfolgte durch an den Rohren angebrachte Schläuche gefüllt mit Silikonöl, die zu einem Druckumwandler führten. Der freie Luftraum von 250 mm<sup>3</sup> in den Rohren führte jedoch zu einem geringfügig verfälschte Druckmessergebnis (P.Kalifa et al. S.1921 [33]).

In Abbildung 3-8 ist eine schematische Darstellung der Druckmesssonde zu sehen.

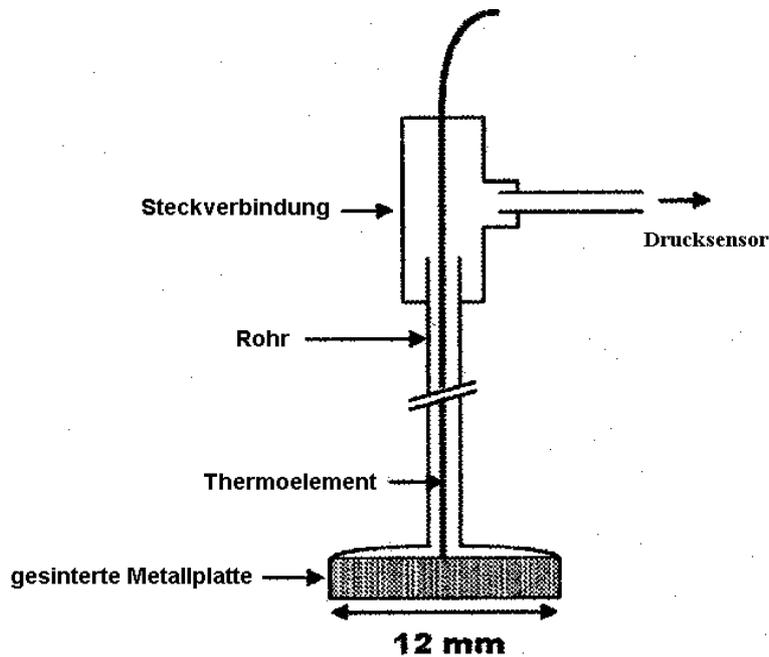


Abbildung 3-8: Druckmesssonde CSTB (P.Kalifa et al. S.9 [35])

Die Erwärmung der Probekörper erfolgte einseitig mit einem Heizstrahler mit bis zu 800 °C. Der Masseverlust während der Versuchsdauer wurde mittels einer Waage festgehalten. Die Druckübertragung erfolgt vom Sondenkopf über ein geringes Volumen Luft in der einbetonierten Röhren zu einem mit Öl gefülltem Schlauch der zu einem piezoelektrischen Druckwandler führt.

In der nachfolgenden Abbildung 3-9 ist das Ergebnis eines Versuches mit Normalbeton in verschiedenen Tiefenstufen bei 600 °C zu sehen. Der größte dabei aufgetretene Porendruck ist in einer Tiefe von 30 mm entstanden und betrug in etwa 1,8 bar (18 MPa) nach einer Versuchszeit von etwa 2 Stunden. Die den größten Porendrücken zugehörigen Temperaturen lagen etwa in der Bandbreite zwischen 180 °C und 220 °C.

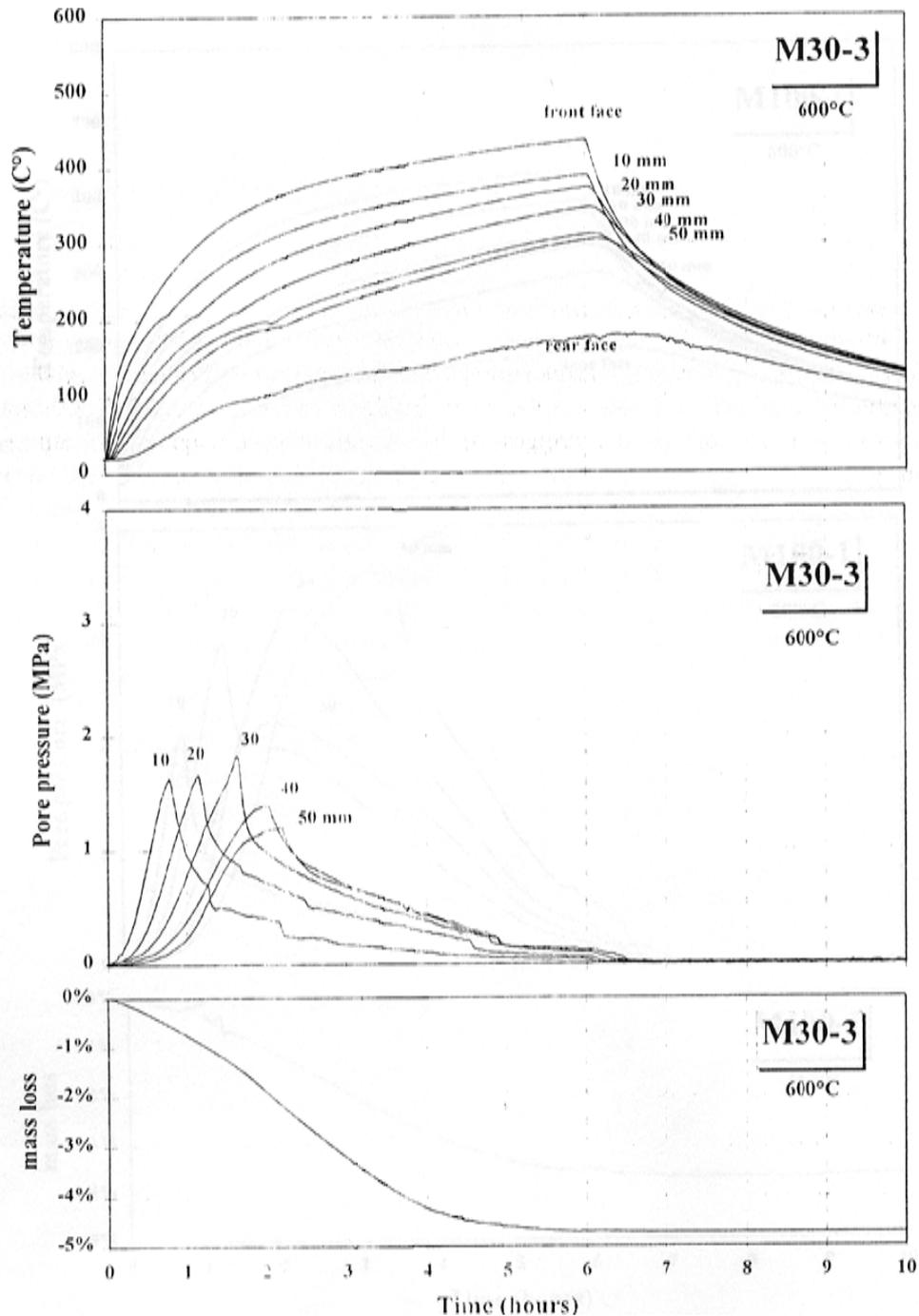


Abbildung 3-9: Temperaturverlauf, Porendruckverlauf und Masseverlust von Normalbeton bei 600 °C  
(P.Kalifa et al. S. 1918 [33])

Der maximal in Normalbeton gemessene Druck lag bei 18 bar (in 30 mm Tiefe). Bei den hochfesten Betonen wurde sogar ein Druck bis zu 37 bar (in 50 mm Tiefe) gemessen (P.Kalifa et al. S. 1922 [33]). Durch Zugabe von 3 kg PP-Fasern konnte der Druck auf über ein Drittel reduziert werden (P.Kalifa et al. S. 11 [35]).

### 3.4 Forschungsauftrag des *Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)*, Österreich 2003

Das Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung IBS hat in Zusammenarbeit mit der Straßenforschung 3.269 und HL-AG die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie veröffentlicht, in dem Untersuchungen an vorgespannten Bauteilen bezüglich Brandschutz durchgeführt wurden. Es wurden Platten mit den Abmessungen 1,40 x 1,80 x 0,3 m und 1,40 x 1,80 x 0,5 m hergestellt. Diese Prüfkörper hatten unterschiedliche Vorspannungen, Wassergehalt, Fasergehalt (0 kg bis 3 kg PP-Fasern) und unterschiedliche Zuschläge (Kalk, Quarz). Als Brandkurve für die Versuche wurde die Rijkswaterstaatkurve (RWS 120') gewählt, die nach 10 Minuten 1200°C und nach 60 Minuten 1350 °C erreicht. Anschließend erfolgt eine Abnahme der Temperatur auf 1200°C nach 120 Minuten.

Die Messeinrichtung wurde in Anlehnung an die in Kapitel 3.3 angeführten Untersuchungen des *CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment)* entwickelt.

Der Porendruck wurde mittels Drucksonden mit Durchmesser 38 mm der Firma *Geodata* (Abbildung 3-10) in verschiedenen Tiefenstufen gemessen.

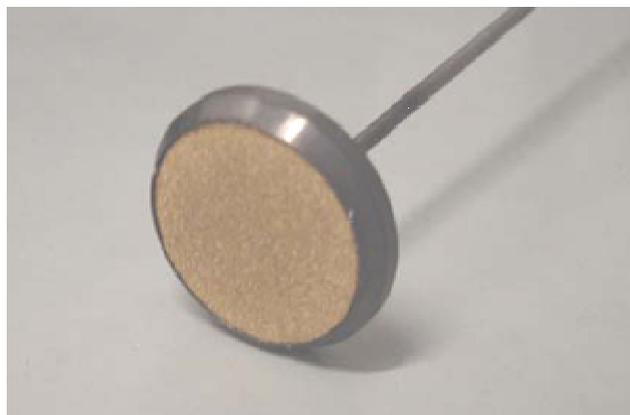


Abbildung 3-10: Drucksonde (W. Lindlbauer et al. S.6 [32])

Diese Sonden bestehen aus einer Platte aus gesintertem Metall, die in einem Stahlteller eingeklemmt ist. An der Rückseite ist ein Stahlröhrchen mit 1 mm Innendurchmesser angeschweißt, das aus der Probe zum Druckaufnehmer führt (W. Kusterle et al. S.121 [16]).

In der folgenden Abbildung 3-11 ist die Herstellung der Versuchskörper mit den eingebauten Drucksonden zu erkennen.



Abbildung 3-11: Versuchskörper mit Druckmessenden (W. Lindlbauer et al. S.3 [32])

Damit die Sonden beim Einbau nicht beschädigt werden konnten wurden nach unten abgeschlossene PE-Rohre als Aussparung eingebaut. In diese Aussparungen wurden nach einer ersten Verfestigung des Betons die Sonden eingebracht, die Rohre gezogen und der verbleibende Hohlraum verfüllt. Ein Ergebnis von Temperaturmessungen und dazugehörigen Dampfdruckmessungen in verschiedenen Tiefenstufen ist in Abbildung 3-12 bzw. Abbildung 3-13 zu sehen.

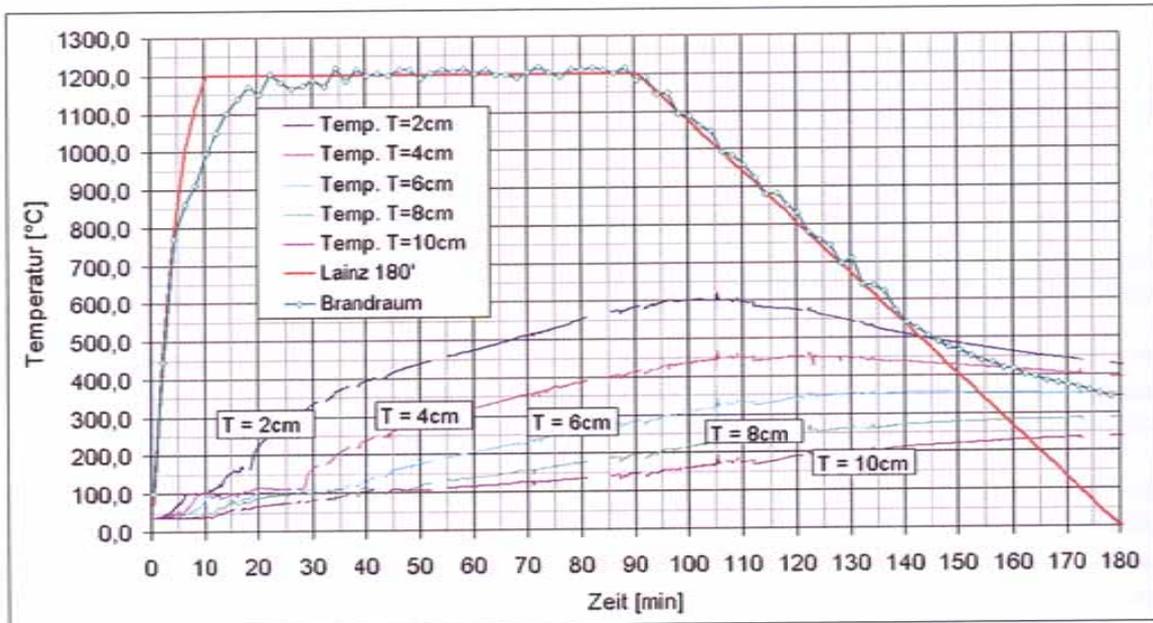


Abbildung 3-12: Temperaturmessungen in den einzelnen Tiefenstufen der Druckaufnehmer in Faserbeton (W. Kusterle et al. S.122 [16])

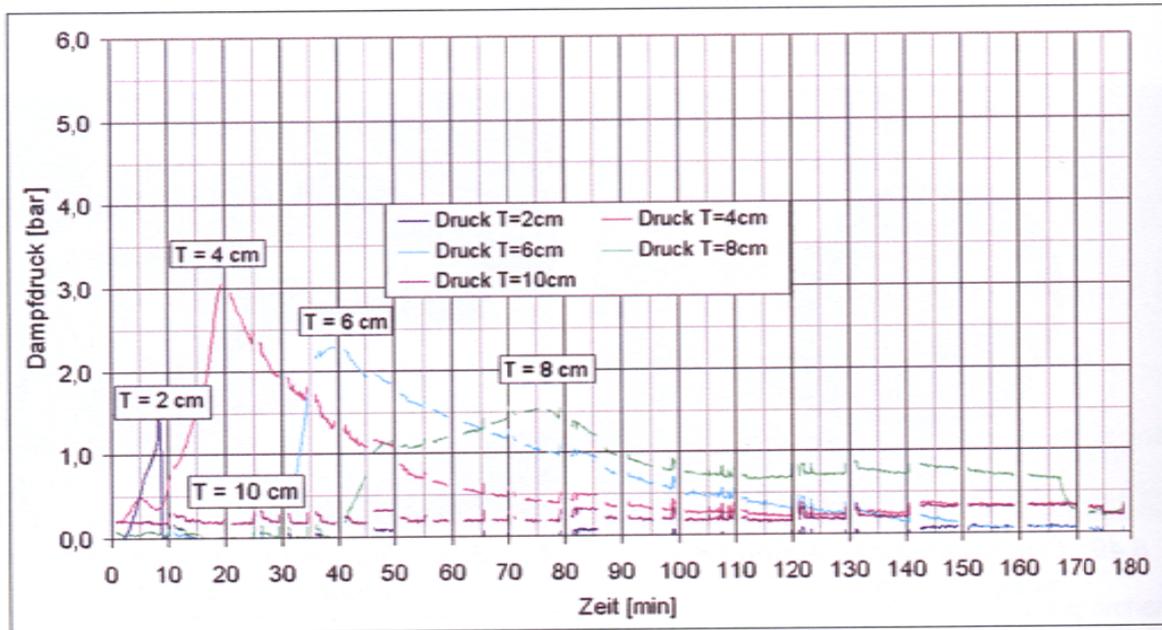


Abbildung 3-13: Dampfdruckmessungen in den einzelnen Tiefenstufen (W. Kusterle et al. S.122 [16])

In dieser Messung trat der maximale Druck von ca. 3 bar in einer Tiefe von 4 cm bei einer Temperatur von in etwa 110 °C auf. Der maximal in dieser Forschungsarbeit gemessene Druck betrug 10 bar. Dabei ist interessant, dass diese Drücke und die Temperaturen bei denen diese auftraten bei weitem unter jenen der in Kapitel 3.3 behandelten Untersuchungen des *CSTB*, obwohl eine nahezu identischer Messeinrichtung und ähnliche Betone verwendet wurden. Die Proben hier waren jedoch vorgespannt und vor allem war die Brandbelastung durch die RWS-Kurve eine andere im Vergleich zu den konstant 600 °C bzw. 800 °C in den Versuchen des *CSTB*. Durch den hohen Aufheizgradienten der RWS-Kurve ist zu erwarten, dass sich die höchsten Dampfdrücke im Vergleich der *CSTB*-Versuche früher einstellen, da der Dampf weniger Zeit zum Ausdiffundieren hat und die maximale Aufheiztemperatur höher liegt. Weiters ist es denkbar, dass durch die rasche Erwärmung im Beton hohe Eigenspannungen entstehen, und der Beton deshalb ebenfalls früher abplatzt und geringere Porendrücke aufnehmen kann.

### 3.5 Gegenüberstellung der Messergebnisse des *NIST*, *CSTB* und des *BMVIT*

In Tabelle 3-1 sind die Ergebnisse der in den vorangegangenen 3 Kapitel erwähnten Forschungsarbeiten nochmals tabellarisch aufgelistet.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Ergebnisse des *NIST*, *CSTB* und *BMVIT*

Verfasser	Betonsorte	Lagerung	max. Ergebnis [bar]	Tiefe [mm]	Temp. in dieser Tiefe [°C]	Temperaturbeaufschlagung	Quelle
NIST	hochfest ohne Fasern	Wasser	21	25	240	5 °C/min bis 600 °C	L.T. Phan S.7 [30]
NIST	hochfest mit 1,5 kg Fasern	Wasser	14	25	240	5 °C/min bis 600 °C	L.T. Phan S.7 [30]
NIST	hochfest mit 3 kg Fasern	Wasser	5	25	180	5 °C/min bis 600 °C	L.T. Phan S.7 [30]
NIST	Normalbeton ohne Fasern	Wasser	13	25	220	5 °C/min bis 600 °C	L.T. Phan S.7 [30]
NIST	Normalbeton ohne Fasern	Luft	4	25	170	5 °C/min bis 600 °C	L.T. Phan S.7 [30]
NIST	Zementmörtel	-	33	19	160	auf 800 °C in 580 s	NIST S.139 [31]
CSTB	Normalbeton ohne Fasern	Luft	18	30	195	600 ° konstant	P.Kalifa et al. S.1918 [33]
CSTB	hochfest ohne Fasern	Luft	37	50	-	600 ° konstant	P.Kalifa et al. S.1922 [33]
BMVIT	Normalbeton mit Fasern	-	10 bar	40	110	RWS-Kurve	W. Kusterle et al. S.122 [16]

Die unterschiedlichen Temperaturbelastungen und Betonsorten erschweren einen Vergleich der gewonnenen Ergebnisse und verwendeten Messeinrichtungen. Das *CSTB* konnte in ihren Versuchsreihen die höchsten Drücke erzielen, obwohl auch das *BMVIT* und *NIST* großteils eine ähnliche Messeinrichtung verwendeten. Da diese Versuche mit einer konstanten Temperaturbeaufschlagung erfolgten ist es vorstellbar, dass dies Einfluss auf die maximal entstehenden Kapillarporendrucke hat. Weiters ist interessant, dass sich bei allen Versuchen des *CSTB* und *NIST* der Temperaturbereich im Beton bei dem die größten Drücke auftraten zwischen 160 °C und 240 °C lag, bei den Untersuchungen des *BMVIT* mit 110 °C deutlich darunter.

Eine gewisse Ungenauigkeit der Ergebnisse liefert auch die bei den oben erwähnten Versuchen die Messeinrichtung. Da die verwendeten Kapillarrohre mit kompressibler Luft gefüllt sind kommt es zu einer kleinen Ungenauigkeit und Verzögerung der Messergebnisse. Weiters kann die große Fläche der verwendeten Drucksonden (12-38 mm Durchmesser) das Ergebnis beeinflussen, da dadurch der Druck über einen relativ großen Bereich aufgenommen wird. Deshalb wurde in dieser Arbeit versucht diese Schwachstellen zu verbessern.

### 3.6 Weitere Untersuchungen

In Tabelle 3-2 sind noch einige weitere Ergebnisse von Untersuchungen angegeben, die über die bis jetzt gemessene Spannweite von Porendrücken Aufschluss geben sollen.

Tabelle 3-2: Weitere Untersuchungen zu Porendruck

Verfasser	Probekörper	max. Ergebnis [bar]	Temp.	Jahr	Publikation	Sekundärquelle
G.R. Consolazio et al.	Zementmörtel	31	-	1998	Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating	P.Kalifa et al. S. 1920 [33]
K. Harada, K. Negeshi	Zementmörtel	2	-	1998	Spalling of cement mortar during fire	P.Kalifa et al. S. 1920 [33]
V.V. Zhukov , V.I. Shevchenko	Normalbeton	7	400 °C	1974	Investigation of Causes of Possible Spalling and Failure of Heat-Resistant Concrete at Drying, First Heating and Cooling	Z.P. Bazant et al. S. 1074 [34]
G.L. England, A.D. Ross	Normalbeton	2,8	137 °C	1970	Shrinkage, Moisture, and Pore Pressures in Heated Concrete	Z.P. Bazant et al. S. 1074 [34]

Diese Versuche sind jedoch nicht direkt miteinander vergleichbar, da unterschiedliche Betonarten und Temperaturbeanspruchungen verwendet wurden und nicht alle Daten darüber vorliegen, aber sie geben Aufschluss darüber wie unterschiedlich bisherige Forschungsergebnisse waren.

## 4 Versuchsplanung und Durchführung

### 4.1 Versuchsplanung

Das ursprüngliche Ziel dieser hier vorliegenden Arbeit war nicht nur ein Beitrag zur Entwicklung einer Messanordnung für den Kapillarporendruck, sondern auch der Vergleich zwischen den auftretenden Drücken in leicht abplatzenden und schwer abplatzenden (Faserbeton) Normalbetonen in verschiedenen Tiefen.

Zu diesem Zweck wurden für Vorversuche in Zusammenarbeit mit meinem Kollegen *Christoph Kosch* drei Betonplatten mit 12 cm Dicke aus einer schwer abplatzenden Mischung (RK 01, siehe Kapitel 4.2 Betonrezepturen) für Vorversuche hergestellt, um die Arbeitsabläufe der Herstellung und Prüfung zu erlernen und zu rationalisieren. Des Weiteren wurde dadurch kontrolliert, ob die Mischung richtig gewählt wurde und somit keine Abplatzungen auftreten.

Für die Hauptversuche wurden jeweils 4 Platten mit 10 cm Dicke aus einer leicht und einer schwer abplatzenden Mischung hergestellt. Zusätzlich wurden noch zu jeder Platte mindestens 2 Probewürfel für die Ermittlung der Druckfestigkeiten erzeugt.

In der ursprünglichen Versuchsplanung wären durch die 4 Platten für jede Mischung jeweils zwei Messungen in den Tiefen 5 mm, 15 mm, 25 mm und 35 mm möglich gewesen, da 2 Manometer zur Verfügung standen. Diese anfangs geplante Versuchsdurchführung mit den dafür hergestellten Platten ist in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Ursprüngliche Versuchsplanung

Platte	Mischung	Messtiefe [mm]	Messtiefe [mm]
KM-VV12-1	RK 01*	-	-
KM-VV12-2	RK 01*	-	-
KM-VV12-3	RK 01*	-	-
M-HV10-1	RK 02	5	15
M-HV10-2	RK 02	15	25
M-HV10-3	RK 02	25	35
M-HV10-4	RK 02	35	5
M-HV10-5	RK 01	5	15
M-HV10-6	RK 01	15	25
M-HV10-7	RK 01	25	35
M-HV10-8	RK 01	35	5

Die Messung sollte über zwei einbetonierte Kapillarrohre mit 0,23 mm Innendurchmesser erfolgen, die mit Öl gefüllt wurden und über die in Kapitel 5.2 Versuche 1 angeführte Messeinrichtung gemessen werden.

Da die ersten beiden Brandversuche auf diese Weise keinerlei Ergebnis brachten, wurde die zunächst angenommene Versuchsplanung und Aufgabenstellung verworfen. Die neue Aufgabenstellung bestand darin, einen Beitrag zur Ermittlung einer Messanordnung zur Ermittlung des Kapillarporendruckes unter Brandbeanspruchung zu leisten.

Zu diesem Zwecke wurden für die folgenden 3 Brandversuche bereits von vorhergehenden Diplomarbeiten bestehende Betonplatten mit dem Bindemittel Slagstar mit jeweils veränderten Messeinrichtungen präpariert wie in den Kapiteln 5.3 bis 5.5 nachzulesen ist.

Der abschließende Versuch wurde mit einer neu betonierten, kleineren Platte mittels dem neuen, kleineren Versuchsbrandofen des Institutes durchgeführt (Kapitel 5.6).

Eine Übersicht der tatsächlich ausgeführten Versuche ist in Tabelle 4-2 zu sehen.

Tabelle 4-2: Ausgeführte Brandversuche

<b>Platte</b>	<b>Mischung</b>	<b>Messtiefe [mm]</b>	<b>Messtiefe [mm]</b>
<b>KM-VV12-1</b>	RK 01*	-	-
<b>KM-VV12-2</b>	RK 01*	-	-
<b>KM-VV12-3</b>	RK 01*	-	-
<b>M-HV10-1</b>	RK 02	5	15
<b>M-HV10-2</b>	RK 02	15	25
<b>M-Versuch 2</b>	Slagstar	25	25
<b>M-Versuch 3</b>	Slagstar	25	25
<b>M-Versuch 4</b>	Slagstar	25	25
<b>M-Versuch 5</b>	RK 02	15	15

Details zu den Mischungen RK 01 und RK 02 sind dem folgenden Kapitel 4.2 Betonrezepturen zu entnehmen.

## 4.2 Betonrezepturen

### 4.2.1 Allgemeines

Die Zusammenstellung der Betonrezepturen RK 01\*, RK 01 und RK 02 ist an die Betonrezepturen RK 06 und RK 09 der Diplomarbeit von Christian Walter Baierl (*C.W. Baierl* S.95 und S.117 [13]) angelehnt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Mischung RK 01 nicht anfällig auf Abplatzungen sein sollte, wohingegen die Mischung RK 02 leicht abplatzen sollte.

Es wurden Rundkörnungen mit dem Größtkorn 16 in den Klassen 0/1, 1/4, 4/8, 8/16 verwendet (siehe Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-4) die von der Firma *Kies Union*, Werk Bad Fischau geliefert wurden.



Abbildung 4-1: Kornklasse 0/1



Abbildung 4-2: Kornklasse 1/4



Abbildung 4-3: Kornklasse 4/8



Abbildung 4-4: Kornklasse 8/16

Aus den jeweiligen Körnungen wurden Proben genommen und diese wurden zwei mal in einem Siebturm (siehe Abbildung 4-5) mit Maschenweiten von 0,063 mm bis 16,0 mm zwei Minuten gesiebt, den Rückstand auf den einzelnen Sieben auf 0,5 Gramm genau abgewogen und daraus die Mittelwerte gebildet.



Abbildung 4-5: Siebturm

Mittels dem Tabellenprogramm Microsoft Excel wurde aus den so ermittelten Größenanteilen für beide Mischungen eine Sieblinie erstellt, die den Anforderungen für den günstigen Bereich im Bild NAD 4, Grenzsieblinie Größtkorn 16 mm der ÖNORM B 4710-1, entspricht.

#### 4.2.2 Mischung RK 01\* (1,5 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern)

Da in Kornklasse 1/4 ein sehr hoher Feinkornanteil vorhanden war, konnte zunächst bei der Mischung RK 01\* auf die Kornklasse 0/1 vollständig verzichtet werden (Vorversuche). Die zugehörige Sieblinie ist in der Abbildung 4-6 dargestellt.

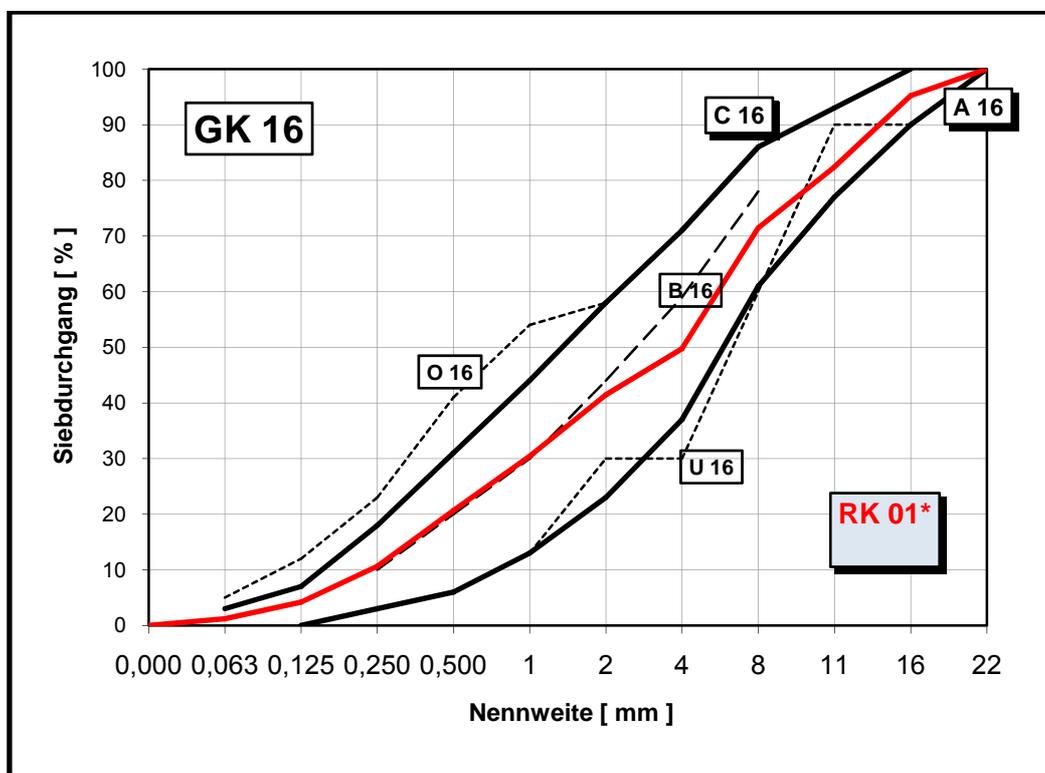


Abbildung 4-6: Sieblinie RK 01-1 (rote Farbe)

Die verwendete Betonrezeptur ist in Tabelle 4-3 zu sehen.

Tabelle 4-3: Betonrezeptur RK 01\*

Komponente	RK 01*			Pro Mischung
	Menge lt. Vorlage [kg/m³]	Menge Eigenrezeptur [kg/m³]	Menge [%]	Menge Eigenrezeptur [kg]
<b>Zuschlagstoff</b>			<b>78,3</b>	
Rundkorn 0 - 1	475,000	0,0	0,00	0,000
Rundkorn 1 - 4	474,000	975,0	40,21	50,257
Rundkorn 4 - 8	284,000	480,0	19,79	24,742
Rundkorn 8 - 16	662,000	445,0	18,35	22,938
<b>Bindemittel</b>			<b>13,9</b>	
Portlandhüttenzement (EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42)	336,000	336,0	13,86	17,319
<b>Fasern</b>			<b>0,1</b>	
PP-Fasern: 6mm Länge, 15 µm Durchmesser	1,500	1,50	0,06	0,077
<b>Fließmittel</b>			<b>0,1</b>	
Dynamon SX 14	5,000	5,0	0,20	0,257
<b>Wasser</b>	185,000	185,0	7,63	9,536
<b>Summe:</b>	<b>2422,500</b>	<b>2425,0</b>	<b>100,0</b>	<b>125,000</b>
	<b>W/B = 0,55</b>			

#### 4.2.3 Mischung RK 01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Da der Sack mit der Korngruppe 1/4 nicht für die Herstellung aller Betonplatten ausreichte, musste für die Hauptversuche eine neue, möglichst ähnliche Mischung mit einer neuen Korngruppe 1/4 gefunden werden. Diese bestand aus allen 4 bereits oben erwähnten Korngruppen. Die Sieblinie für die dadurch neu entstandene Mischung RK ist dazu in Abbildung 4-7 dargestellt. Sie wurde möglichst an die Sieblinie RK 01 angepasst.

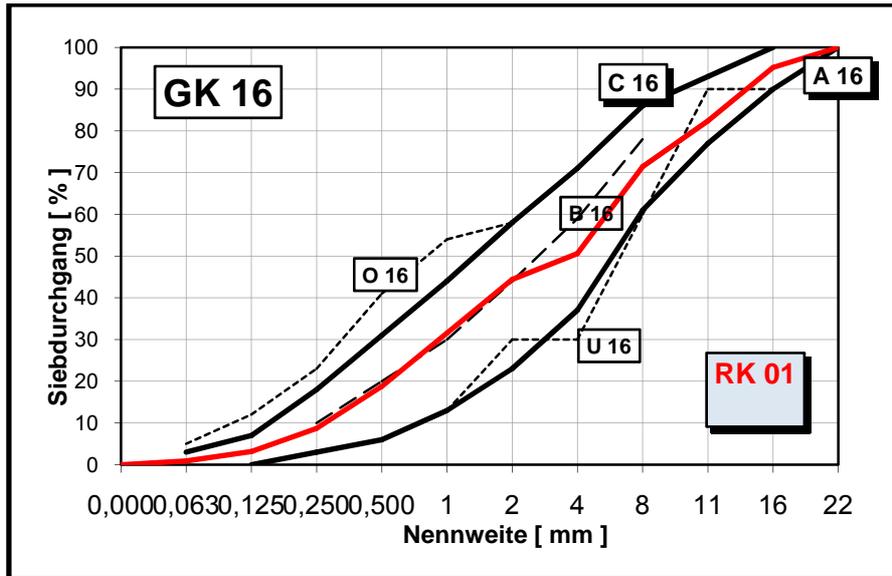


Abbildung 4-7: Sieblinie RK 01 (rote Farbe)

Die dazugehörige Betonrezeptur (siehe Tabelle 4-4) wurde im Vergleich zu RK 01\* auch noch dahingehend verändert, dass der Fließmittelanteil verringert wurde um eine Reduzierung des Ausbreitmaßes (Mischung RK 01\* hatte die Konsistenz F 73, extrem fließfähig) zu erzielen.

Tabelle 4-4: Betonrezeptur RK 01

Komponente	RK 01			Pro Mischung	
	Menge lt. Vorlage [kg/m³]	Menge Eigenrezeptur [kg/m³]	Menge [%]	Menge Eigenrezeptur [kg]	
<b>Zuschlagstoff</b>			<b>78,3</b>		
Rundkorn 0 - 1	475,000	600,0	24,74	30,928	
Rundkorn 1 - 4	474,000	975,0	15,46	19,330	
Rundkorn 4 - 8	284,000	480,0	19,79	24,742	
Rundkorn 8 - 16	662,000	445,0	18,35	22,938	
<b>Bindemittel</b>			<b>13,9</b>		
Portlandhüttenzement (EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42)	336,000	336,0	13,86	17,319	
<b>Fasern</b>			<b>0,1</b>		
PP-Fasern: 6mm Länge, 15 µm Durchmesser	1,500	1,50	0,06	0,077	
<b>Fließmittel</b>			<b>0,1</b>		
Dynamon SX 14	5,000	2,52	0,10	0,130	
<b>Wasser</b>	185,000	185,0	7,63	9,536	
<b>Summe:</b>	<b>2422,500</b>	<b>2425,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>125,000</b>
	<b>W/B = 0,55</b>				

#### 4.2.4 Mischung RK 02 (0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern)

Für die leicht abplatzbare Mischung RK 02 ergab sich folgende in Abbildung 4-8 dargestellte Sieblinie.

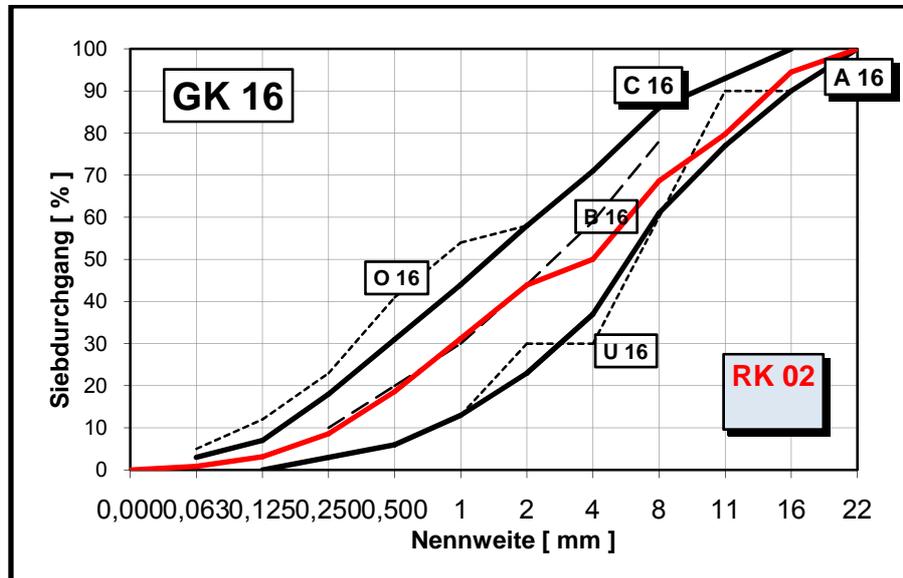


Abbildung 4-8: Sieblinie RK 02

Die dazugehörige Betonrezeptur ist in Tabelle 4-5 angegeben.

Tabelle 4-5: Betonrezeptur RK 02

Komponente	RK 02			Pro Mischung
	Menge lt. Vorlage [kg/m <sup>3</sup> ]	Menge Eigenrezeptur [kg/m <sup>3</sup> ]	Menge [%]	Menge Eigenrezeptur [kg]
<b>Zuschlagstoff</b>			<b>79,9</b>	
Rundkorn 0 - 1	488,000	610,0	25,00	31,245
Rundkorn 1 - 4	486,000	380,0	15,57	19,464
Rundkorn 4 - 8	292,000	435,0	17,83	22,282
Rundkorn 8 - 16	680,000	525,0	21,51	26,891
<b>Bindemittel</b>			<b>12,9</b>	
Portlandhüttenzement (EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42)	315,000	315,0	12,91	16,135
<b>Fasern</b>			<b>0,0</b>	
PP-Fasern: 6mm Länge, 15 µm Durchmesser	0,000	0,00	0,00	-
<b>Fließmittel</b>			<b>0,1</b>	
Dynamon SX 14	5,000	2,36	0,10	0,121
<b>Wasser</b>			<b>7,1</b>	
	173,000	173,0	7,09	8,861
<b>Summe:</b>	<b>2439,000</b>	<b>2440,4</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
	<b>W/B = 0,55</b>			<b>125,000</b>

## 4.3 Herstellen der Platten und Probekörper

### 4.3.1 Mischen des Betons

#### Wiegen

Der Zuschlag, der Zement und das Wasser wurden mit einer Waage der *Sartorius AG Göttingen* (Model *QAT01*) mit einer Ablesegenauigkeit von 10 g entsprechend der zuvor festgelegten Betonrezeptur eingewogen. Das Abwiegen des Fließmittels und der PP-Fasern erfolgte mit einer Waage der selben Firma (Model *Q S16000B*) mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1 g. Eine Charge hatte das Gewicht von 125 kg oder 51,5 l.

Als Beispiel ist dazu in

Abbildung 4-9 die eingewogene Mischung RK02 für eine Charge dargestellt.



Abbildung 4-9: Betonbestandteile Mischung RK 02

## Mischen

Mit einem Wirblermischwerkzeug wurde der Mischprozess in dem *Eirich-Intensivmischer R08W* durchgeführt (siehe Abbildung 4-10). Das Mischprinzip des *Eirich-Systems* ermöglicht erfassbare und reproduzierbare Mischvorgänge. Der drehende Mischbehälter transportiert das Mischgut, es gibt keine Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Mischbehälterwand oder -boden und Mischgut. Boden- und Wandreibung kann nur am Boden-Wandabstreifer auftreten. Das Mischgut wird dort jedoch konstant langsam angeliefert. Diese Geschwindigkeit ändert sich nicht, wenn das Wirblerwerkzeug schneller oder langsamer läuft. Das Wirblerwerkzeug kann somit beliebig schnell laufen, ohne erhöhte Reibung im Wand- oder Bodenbereich zu bewirken. Der Verlust an Bewegungsenergie bleibt konstant, unabhängig von den Geschwindigkeiten des Mischwerkzeugs.

Bei einem normalen Zwangsmischer setzt sich die elektrische Arbeit aus Mischarbeit, Reibungsarbeit und Verschleißarbeit zusammen. Im Gegensatz dazu ist bei dem *Eirich-Mischer* die elektrische Arbeit nahezu gleich der Mischarbeit. Dadurch ist eine besonders genaue Reproduzierbarkeit der Chargen bei diesem Mischer gewährleistet.



Abbildung 4-10: *Eirich-Intensivmischer* mit Schaltkasten

Die Steuerung des Mixers erfolgt über einen Touchscreen im Steuerungsschrank (siehe Abbildung 4-11). Es können darin Mischabläufe programmiert werden und die Mischleistung wird während des Mischvorganges aufgezeichnet.

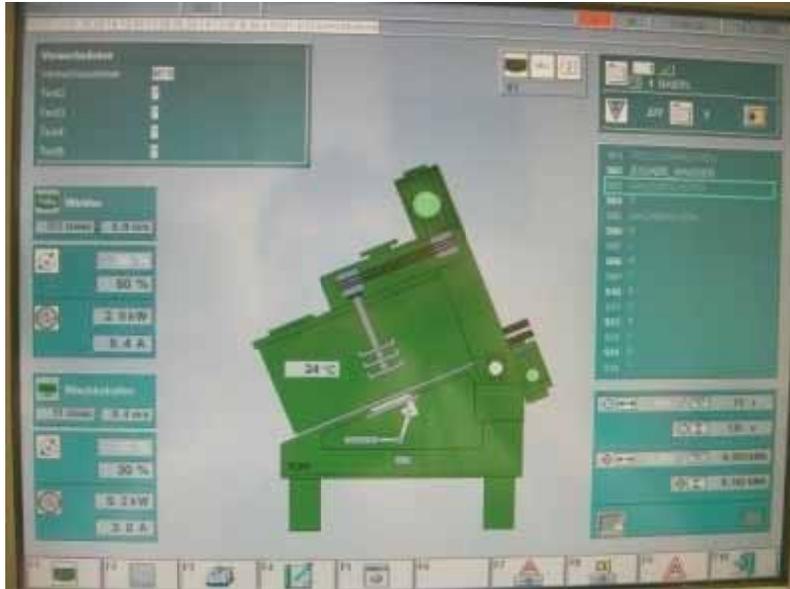


Abbildung 4-11: Touchscreen Eirich-Mischer

Als Mischwerkzeug wurde ein so genannter Stiftenwirbler (siehe Abbildung 4-12) auf Empfehlung von Frau *Karin Safranek* verwendet, die ihre Diplomarbeit an der TU-Wien zu dem Thema „Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone“ schreibt und ihre Versuche gezeigt haben, dass mit diesem Mischwerkzeug eine äußerst gleichmäßige Durchmischung der Betonkomponenten möglich ist.



Abbildung 4-12: Stiftenwirbler

Das Mischen des Betons einer Charge erfolgte mit folgendem Mischablauf:

- Nach Größe geordnetes Einbringen der Zuschläge in den Mischer, beginnend mit der größten Kornfraktion
- Bei den Mischungen RK01-1 und RK01-2 erfolgte danach die Zugabe der Polypropylenfasern
- Zugeben des Bindemittels
- Eine halbe Minuten Trockenmischen
- Zugabe des Wassers und des darin verdünnten Fließmittels
- 2,5 Minuten Nassmischen
- Entnahme des Betons.

#### 4.3.2 Betonieren der Versuchsplatten

Als Schalung wurden leicht konische Holzschalungen (siehe Abbildung 4-13) verwendet, um das Herauslösen des Betons zu erleichtern.



Abbildung 4-13: Holzschalungen

Die mit Schalöl benetzten Holzschalungen wurden auf eine Rüttelplatte gestellt und mit dem Frischbeton gefüllt.

Die Vorgangsweise dafür war:

- Aufbringen von Beton in den Eckbereichen der Schalung
- Darauf wurde eine zugeschnittene Bewehrungsmatte (ca. 47 x 57 cm) mit 10 mm Durchmesser auf eine Höhe von in etwa 15 mm über den Schalungsboden eingedrückt.
- In die Mitte der Platte wurde ein vorgefertigtes Thermoelement angebracht (siehe Abbildung 4-14) und so ausgerichtet, dass die Temperaturfühler nicht den Bewehrungsstahl berühren, um keine Beeinflussung der Temperaturmessung durch den gut wärmeleitenden Stahl hervorzurufen. Bei diesen Thermoelementen wurden Temperaturfühler in bestimmten Abständen (bei den Hauptversuchen in 5, 15, 25, 35 mm) in Prismenform einbetoniert.



Abbildung 4-14: Thermoelemente

- Das Thermoelement wurde mit einigen Kellen voll Frischbeton fixiert und danach die restliche Schalung bis auf die gewünschte Höhe ausgefüllt. Die Drähte der Temperaturfühler wurden über die Betonoberfläche geführt und es wurde darauf geachtet, dass die Enden der Drähte frei und trocken bis zum Zeitpunkt der Versuche gehalten wurden.

- Einschalten der Rüttelplatte bis keine wesentliche Blasenbildung an der Oberfläche mehr erkennbar war.
- Anbringen von Beschriftungsetiketten und 24 h Lagerung.

### 4.3.3 Betonieren der Prüfkörper

Pro Charge wurden mindestens zwei Probewürfel hergestellt. Hierzu wurden bereits vorhandene Kunststoffschalungen (siehe Abbildung 4-15) mit den Abmessungen 15 x 15 x 15 cm verwendet. Die Schalungen wurden vor der Verwendung gereinigt und mit Schalöl benetzt.



Abbildung 4-15: Schalung Probewürfel

Der Frischbeton wurde mittels einer Kelle in die Schalung bis zur Oberkante eingebracht und auf der Rüttelplatte verdichtet. Danach wurde ein Beschriftungsetikett auf die Oberfläche des feuchten Betons gelegt und 24 Stunden gelagert.

### 4.3.4 Lagerung

Die Platten und die Probekörper wurden nach dem Betonieren 24 Stunden in den Schalungen gelagert und danach ausgeschalt. Danach kamen sie, der ÖNORM B 3303 entsprechend, 7 Tage in die Wasserlagerung (siehe Abbildung 4-16), um ein gleichmäßiges Abbinden zu ermöglichen.



Abbildung 4-16: Wasserlagerung

Nach 7 Tagen wurden die Platten und Prüfkörper aus dem Wasserbad entnommen und bis zu ihrer weiteren Verwendung an der Luft getrocknet.

## 4.4 Betonprüfung

### 4.4.1 Frischbetonprüfung

Bei jeder neuen Mischung wurden das Ausbreitmaß, die Rohdichte und der Luftporengehalt an mindestens zwei Chargen bestimmt.

Für die Bestimmung des **Ausbreitmaßes** wurde die ÖNORM EN 12350-5, Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß, verwendet. Dazu wird in die Prüfform in zwei Schichten Beton eingefüllt und mit dem Stößel verdichtet. Danach wird die Form lotrecht abgezogen und der Ausbreittisch 15-mal bis zum Anschlag angehoben und fallengelassen. Als Ausbreitmaß  $a$  gilt der Mittelwert zweier parallel zu den Kanten des Ausbreittisch gemessener Durchmesser des Ausbreitkuchens auf cm gerundet. Die dabei verwendeten Utensilien sind in Abbildung 4-17 ersichtlich.



Abbildung 4-17: Ausbreittisch mit Stößel und Prüfform

Die **Rohdichte** und der **Luftporengehalt** wurde nach ÖNORM EN 12350-7 ermittelt. Der dazu benötigte Luftgehaltsprüfer, bestehend aus einem Luftporentopf mit 8 l Volumen und dem Deckel mit Druckmessgerät, ist in Abbildung 4-18 dargestellt.



Abbildung 4-18: Luftgehaltprüfer

Zur Ermittlung der Rohdichte wurde der leere Topf abgewogen und der Frischbeton eingebracht. Danach wurde der Beton verdichtet, der überstehende Beton abgezogen und der gefüllte Topf wieder gewogen. Durch die beiden Massen und dem genormten Topfvolumen von 8 l lässt sich nun die Rohdichte errechnen.

Die weitere Vorgehensweise für die Ermittlung des Luftporengehaltes erfolgte lt. Norm.

Bei der Prüfung des Luftgehaltes wird zwischen einem mit Beton und einem mit Druckluft gefüllten Behälter Druckausgleich hergestellt. Der dabei durch den Luftgehalt des Betons bedingte Druckabfall wird auf einem kalibrierten Manometer als prozentualer Luftgehalt der Probe abgelesen.

#### 4.4.2 Festbetonprüfung

Die Bestimmung der **Druckfestigkeit** der Probewürfel erfolgte nach den Bestimmungen der ÖNORM EN 12390-3. Für die ersten Vorversuche wurde nur die 7-Tage-Festigkeit ermittelt. Bei den für die Hauptversuche hergestellten Platten wurde die Festigkeit nach 28 Tagen geprüft, sowie zu jeder Platte zugehörig mindestens ein Würfel, der nach der Brandbeanspruchung geprüft wurde. Die Prüfung erfolgte mit der laboreigenen Prüfmaschine der Fa. *Toni Technik* (Modell 2040, max. Prüfkraft 3000 kN, Güteklasse 1, siehe Abbildung 4-19) und die Steuerung der Versuche, Aufzeichnung und Visualisierung der Ergebnisse wurde über die Software testXpert durchgeführt. Die Einstufung in Festigkeitsklassen erfolgt nach ÖNORM B 4710-1.



Abbildung 4-19: Prüfmaschine Druckfestigkeit

Das typische Bruchbild eines geprüften Betonwürfels zeigt die Abbildung 4-20. Dieses entsteht dadurch, dass im Bereich der gedrückten Betonflächen und der Maschinendruckplatten die Querdehnung vollständig behindert ist während sie sich im Mittelbereich voll ausbilden kann.

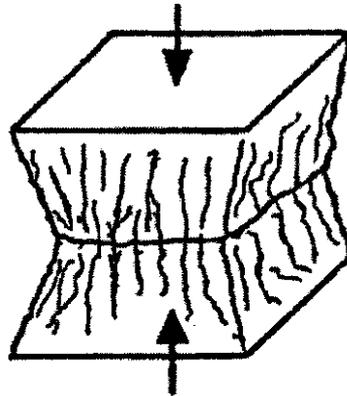


Abbildung 4-20: Bruch eines Betonwürfels beim Druckversuch (U. Schneider S.27 [44])

Um den **Wassergehalt** zum Zeitpunkt der Druckfestigkeitsprüfung, bzw. der Brandversuche zu ermitteln, wurden kleine Stücke des Betons von den Platten und Probewürfeln mit einem Hammer abgeschlagen, abgewogen und etwa 24 Stunden in einem Trocknungsofen (siehe Abbildung 4-21) bei 105 °C gelagert. Die so getrockneten Betonstücke wurden nochmals gewogen und der Wassergehalt über die Differenz der beiden Massen, gebrochen durch die Masse-feucht, ausgerechnet.



Abbildung 4-21: Trocknungsofen

### 4.4.3 Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen

#### 4.4.3.1 ERGEBNISSE FÜR LUFTPORENANTEIL UND AUSBREITMAß

In der folgenden Tabelle 4-7 sind die Ergebnisse für den Luftporenanteil und das Ausbreitmaß der für die Vorversuche hergestellten Probewürfel und Platten dargestellt.

#### Vorversuche:

Tabelle 4-6: Ergebnisse für Luftporenanteil und Ausbreitmaß - Vorversuche

Ch.	Mischung	Datum	Ausbreitmaß	Luftporen	Konsistenz	Würfel	Platte
1	RK 01*	21.11.2006	76 cm	2,1 %	F 73 (extrem fließfähig)	KM-VVPW1 KM-VVPW2	KM-VV-12-1
2	RK 01*	21.11.2006	75 cm	2,3 %	F 73 (extrem fließfähig)	KM-VVPW3 KM-VVPW4	KM-VV-12-2
3	RK 01*	21.11.2006	71 cm	2,3 %	F 73 (extrem fließfähig)	KM-VVPW5 KM-VVPW6 KM-VVPW7 KM-VVPW8	KM-VV-12-3

Da ein extrem fließfähiger Beton lt. ÖNORM B4710-1 Tab. 6 für diese Arbeit nicht anstrebenswert war, wurde aufgrund der Vorversuche beschlossen den Fließmittelanteil pro Charge von 0,257 kg auf 0,130 kg zu reduzieren.

#### Für die Hauptversuche hergestellte Platten:

In der folgenden Tabelle 4-7 sind die Ergebnisse für den Luftporenanteil und das Ausbreitmaß der für die Hauptversuche hergestellten Probewürfel und Platten dargestellt.

Tabelle 4-7: Luftporenanteil und Ausbreitmaß - Versuche

Ch.	Mischung	Datum	Ausbreitmaß	Luftporenanteil	Konsistenz	Würfel	Platte
1	RK 02	13.01.2007	53cm	2,90%	F 52 (sehr weich)		M-HV 10-1
2	RK 02	13.01.2007	52cm	3,10%	F 52 (sehr weich)	M-HV PW1 M-HV PW2	M-HV 10-1 M-HV 10-2
3	RK 02	14.01.2007				M-HV PW3 M-HV PW4	M-HV 10-3 M-HV 10-4
4	RK 02	14.01.2007				M-HV PW5 M-HV PW6 M-HV PW7 M-HV PW8	M-HV 10-4

5	RK 01	14.01.2007	53cm	7,00%	F 52 (sehr weich)	M-HV PW9 M-HV PW10	M-HV 10-5 M-HV 10-6
6	RK 01	14.01.2007	53cm	7,00%	F 52 (sehr weich)	M-HV PW11 M-HV PW12	M-HV 10-6 M-HV 10-7
7	RK 01	14.01.2007				M-HV PW13 M-HV PW14	M-HV 10-8

Der Grund für den extrem hohen Luftporenanteil der Chargen 5 und 6 der Mischung RK 01 ist nicht bekannt. Dadurch, dass die Bestimmung des Luftporenanteils bei zwei verschiedenen Chargen jeweils das selbe Ergebnis brachte, kann ein Messfehler eher ausgeschlossen und eine ungenügende Verdichtung als wahrscheinlich angenommen werden.

#### 4.4.3.2 ERGEBNISSE WASSERGEHALT

##### Vorversuche:

In Tabelle 4-8 ist der im Rahmen der Vorversuche an den Probewürfeln ermittelte Wassergehalt angegeben. Der Wassergehalt wurde nach 10 Tagen Lufttrocknung und 4 Tagen im Trocknungsofen bei 105 °C ermittelt, unmittelbar vor den Brandversuchen, um auf den Wassergehalt der Versuchsplatten rückschließen zu können.

Tabelle 4-8: Wassergehalt Probewürfel Vorversuche

Probewürfel	m <sub>feucht</sub> [g]	m <sub>trocken</sub> [g]	Wassergehalt w [%]
KM-VVPW2	281,5	271,0	3,87
KM-VVPW4	232,0	223,5	3,80
KM-VVPW6	231,0	220,5	4,76

##### Für die Hauptversuche hergestellte Platten:

Der Wassergehalt der für die Versuche betonierten Probewürfel ist in Tabelle 4-9 ersichtlich. Dieser wurde nach 30, bzw. 31 Tagen Lufttrocknung und 24 Stunden im Trocknungsofen bei 105 °C ermittelt.

Tabelle 4-9: Wassergehalt Probewürfel Versuche

Probewürfel	m <sub>feucht</sub> [g]	m <sub>trocken</sub> [g]	Wassergehalt w [%]
M-HV PW1	100,0	96,0	4,17
M-HV PW3	217,0	207,0	4,83
M-HV PW5	76,5	73,5	4,08

M-HV PW7	155,5	149,5	4,01
M-HV PW9	91,0	87,0	4,60
M-HV PW11	104,0	99,5	4,52
M-HV PW13	262,0	251,0	4,38

Dies ergibt einen durchschnittlichen Wassergehalt von 4,37 %.

#### 4.4.3.3 ERGEBNISSE DRUCKFESTIGKEIT

##### Vorversuche:

In Tabelle 4-10 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung für die Vorversuche nach 7 Tagen angeführt.

Tabelle 4-10: Druckfestigkeit Vorversuche

Probennummer	A mm <sup>2</sup>	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	F <sub>max</sub> kN	σ <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>m</sub> mm	W <sub>m</sub> Nm	W <sub>b</sub> Nm
KM-VVPW2 RK01*	22801	150,2	150,5	760,22	33,34	0,96	438,19	493,04
KM-VVPW4 RK01*	22875	152,3	150,2	696,02	30,43	0,93	418,76	485,86
KM-VVPW6 RK01*	22515	150,1	150	737,63	32,76	0,98	462,77	517,41
KM-VVPW8 RK01*	22515	150,1	150	744,68	33,07	0,96	412,54	467,50

Aus dem Mittelwert der σ<sub>m</sub> errechnet sich ein f<sub>cm</sub> von 32,40 N/mm<sup>2</sup> und lt. Tabelle NAD 13 der ÖNORM B 4710-1 kann eine Klassifizierung von C16/20 vorgenommen werden. Daraus lässt sich eine 28 Tage-Festigkeit aus Erfahrungswerten von etwa C 25/30 abschätzen.

##### Für die Hauptversuche hergestellte Platten:

In den Tabelle 4-11 (Mischung RK 02) und Tabelle 4-12 (Mischung RK 01) sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung der für die Hauptversuche hergestellten Probewürfel nach 28 Tagen angeführt.

Tabelle 4-11: Druckfestigkeit Versuche RK02

Probennummer	A mm <sup>2</sup>	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	F <sub>max</sub> kN	σ <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>m</sub> mm	W <sub>m</sub> Nm	W <sub>b</sub> Nm
KM-PW2 RK02	22246	148,9	149,4	1025,17	46,08	0,85	475,84	539,39
KM-PW4 RK02	22515	150,7	149,4	966,67	42,94	0,87	521,05	601,41
KM-PW6 RK02	22574	151,1	149,4	1068,76	47,34	0,88	527,88	592,96
KM-PW8 RK01	22709	152	149,4	1043,07	45,93	0,91	554,13	638,93

Aus dem Mittelwert der σ<sub>m</sub> errechnet sich ein f<sub>cm</sub> von 45,57 N/mm<sup>2</sup>. Lt. Tabelle NAD 13 der ÖNORM B 4710-1 ergibt sich daraus eine 28 Tage-Festigkeit von C25/30

Tabelle 4-12: Druckfestigkeit Versuche RK01

Probennummer	A mm <sup>2</sup>	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	F <sub>max</sub> kN	σ <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>m</sub> mm	W <sub>m</sub> Nm	W <sub>b</sub> Nm
KM-PW10 RK01	22515	150,7	149,4	845,30	37,54	0,76	385,61	457,71
KM-PW12 RK01	22679	151,8	149,4	835,42	36,84	0,83	413,21	475,71
KM-PW14 RK01	22276	149,1	149,4	818,61	36,75	0,80	410,33	484,38

Aus dem Mittelwert der  $\sigma_m$  errechnet sich ein  $f_{cm}$  von 37,04 N/mm<sup>2</sup>. Lt. Tabelle NAD 13 der ÖNORM B 4710-1 ergibt sich daraus eine 28 Tage-Festigkeit von C20/25.

Die Prüfprotokolle und Spannungsverläufe aller durchgeführten Druckversuche sind in Kapitel 11 Anhang angeführt.

## 4.5 Druckgeberflüssigkeit

Für die Füllung der Messvorrichtung mit einer Druckgeberflüssigkeit wurde das Öl *MARLOTHERM SH* der Firma *AVIA* verwendet. Wie in der Tabelle 4-13 ersichtlich ist, liegt der Siedebeginn des Öles bei 385 °C und ist deshalb für Anwendungen im Hochtemperaturbereich sehr gut geeignet.

Um weitere Aussagen über die Oberflächenspannung und den Kontaktwinkel und damit der Kapillarwirkung des verwendeten Öles zu erlangen, wurden Versuche mit dem Tropfenkonturanalyse-System *DSA100* der Firma *Krüss* durchgeführt.

Tabelle 4-13: Technische Daten *MARLOTHERM SH* (AVIA Produktdatenblatt [17])

Chemische und physikalische Kenndaten	Prüfverfahren	AVIA MARLOTHERM SH
Farbe	visuell	gelblich, klar
Dichte bei 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	DIN 51 757 1044
Kin. Viskosität bei 0 °C 20 °C 40 °C 60 °C 100 °C 160 °C 200 °C 260 °C 320 °C 360 °C	mm <sup>2</sup> /s	DIN 51 562 321 47 16,5 8,1 3,1 1,4 0,92 0,57 0,40 0,32
Siedebeginn umgerechnet auf Normaldruck 1,013 bar	°C	DIN 51 356 > 385
Flammpunkt PM	°C	DIN EN 22 719 200
Pourpoint	°C	DIN ISO 3016 - 34
Zündtemperatur	°C	DIN 51 794 450
Pumpbarkeitsgrenze	°C	- - 5
Isobare Spez. Wärme- kapazität (Cp) bei 20 °C	KJ/kgK	- 1,55
Wärmeleitfähigkeit (?) bei 20 °C	W/mK	- 0,131

### Messung der Oberflächenspannung

Zwischen den Molekülen innerhalb einer Flüssigkeit und denen eines nicht in der Flüssigkeit löslichen flüssigen oder gasförmigen Stoffes finden Wechselwirkungen statt, die zu der Ausbildung einer Grenzfläche führen. Um diese Grenz- oder Oberfläche zu verformen, muss Energie aufgewendet werden. Die zur Verformung einer gegebenen Fläche zu verrichtende Arbeit wird als Grenz- oder Oberflächenspannung bezeichnet (*KRÜSS* [26]).

Mit Hilfe eines an einer Präzisionswaage hängenden optimal benetzbaren Messkörpers wird bei diesem Gerät die Oberflächenspannung errechnet. Dabei wird mit Hilfe eines höhenregelbaren Probenträger die Flüssigkeit mit dem Messkörper in Kontakt gebracht. Die Kraft die dabei entsteht wird mit der Waage gemessen. Da die Länge des Messkörpers bekannt ist kann daraus nun die Grenzflächenspannung bzw. Oberflächenspannung ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 4-14 aufgelistet.

Tabelle 4-14: Messergebnisse Oberflächenspannung *Marlotherm*

Calculation Method : Arithmetic Mean

Measuring Data :

N	Measurement Name	IFT [mN/m]	Vol [ul]	Area [qmm]
2	SDM - 1	41,59	16,54	30,42
3	SDM - 2	41,63	16,43	30,17
4	SDM - 3	41,73	16,21	29,73
5	SDM - 4	42,00	15,95	29,26
6	SDM - 5	42,06	15,72	28,85
7	SDM - 6	42,11	15,50	28,48
8	SDM - 7	41,95	16,03	29,40

N - Run Number; IFT - IFT Mean; Vol - Drop Volume; Area - Drop Surface Area;

Calculated Values [mN/m]:  $41,9 \pm 0,21$

Das arithmetische Mittel der gemessenen Werte beträgt 41,87 mN/m.

### Messung Kontaktwinkel

Der Kontaktwinkel ist jener Winkel, den eine Tangente an die Tropfenkontur im Drei-Phasen-Punkt zur Oberfläche des Festkörpers bildet und somit ein Maß für die Benetzbarkeit einer Oberfläche oder Grenzfläche durch eine andere Phase darstellt (*DataPhysics* [27]). Ein großer Kontaktwinkel bedeutet eine schlechte Benetzung (siehe Abbildung 4-22).

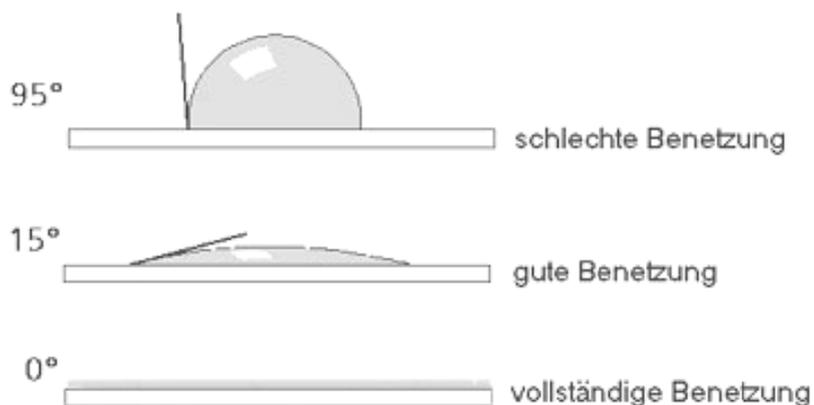


Abbildung 4-22: Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Benetzung (*KRÜSS* [28])

Es wurde der Kontaktwinkel für einen statischen Tropfen gemessen. Das bedeutet, dass das Volumen des Tropfens während der Messung gleich bleibt.

Über eine Kamera wird bei dieser Methode der Umriss des zu prüfenden Tropfens festgehalten und an ein mathematisches Modell angepasst. Dadurch kann eine Tangente vom tatsächlichen Kontaktpunkt des Tropfens mit dem Festkörper an das mathematische Modell gelegt und so der Kontaktwinkel ermittelt werden.

Die Messung wurde auf Polytetrafluorethylen (PTFE) durchgeführt und ergab einen mittleren Kontaktwinkel von  $72,7^\circ$  (siehe Tabelle 4-15).

Tabelle 4-15: Messergebnisse Kontaktwinkelmessung *Marlotherm*

**Calculation Method :** Arithmetic Mean

**Measuring Data :**

N	Measurement Name	CA Result [deg.]	CA(M) [deg.]	CA(L) [deg.]	CA(R) [deg.]
1	SDM - 1	71,6±0,07	71,60	71,60	71,60
2	SDM - 2	75±0,04	74,98	74,98	74,98
3	SDM - 3	72,4±0,02	72,40	72,40	72,40
4	SDM - 4	72,5±0,05	72,47	72,47	72,47
5	SDM - 5	72±0,03	72,02	72,02	72,02

N - Run Number; CA Result - Contact Angle Result; CAM - Contact Angle Mean; CAL - Contact Angle Left; CAR - Contact Angle Right;

**Calculated Values [deg.]:** 72,7±1,33

Nach *Owens, Wendt, Rabel* und *Kaelble (KRÜSS [26])* [lässt sich die Oberflächenspannung jeder Phase in einen polaren und einen dispersiven Anteil aufspalten. Der disperse Anteil beschreibt den Anteil der Londonschen Kräfte und ist somit an jeder Phasengrenze vorhanden. Ein polarer Anteil ist nur beim Vorhandensein polarer Moleküle zu finden. Diese Erkenntnis wird in dem Verfahren von *Fowkes* verwendet welche das *DSA100* verwendet und so die beiden Anteile errechnet. Dabei wird anhand von Kontaktwinkelmessungen mit mindestens einer rein dispersiven Flüssigkeit der disperse Anteil der Oberflächenspannung der Festkörper-Oberflächenenergie durch die Kombination der Grenzflächenspannungsgleichung von *Fowkes* für den dispersiven Wechselwirkungsanteil und der *Young*-Gleichung berechnet.

Dies ergibt die Gleichung

$$\cos \vartheta = 2 \cdot \sqrt{\sigma_s^D} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sigma_l^D}} - 1$$

Darin bedeuten:

$\theta$ ... Kontaktwinkel

$\sigma_s^D$ ... disperse Oberflächenspannungskomponente des Festkörpers

$\sigma_l^D$ ... disperse Oberflächenspannungskomponente der Flüssigkeit

Die Komponenten dieser Gleichung sind in Abbildung 4-23 näher erläutert.

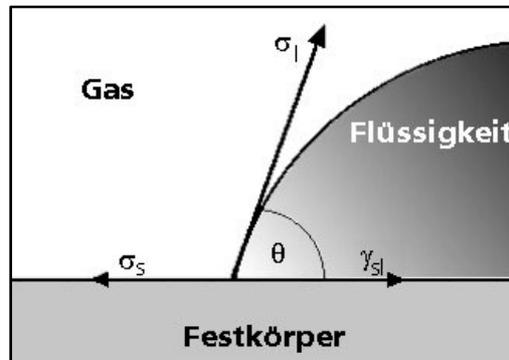


Abbildung 4-23: Kontaktwinkelbildung auf einer Festkörperoberfläche nach Young (KRÜSS [26])

Aus dem gemessenen Kontaktwinkel ist dadurch der disperse Anteil der Flüssigkeit ermittelbar. Grafisch ist dies in Abbildung 4-24 dargestellt.

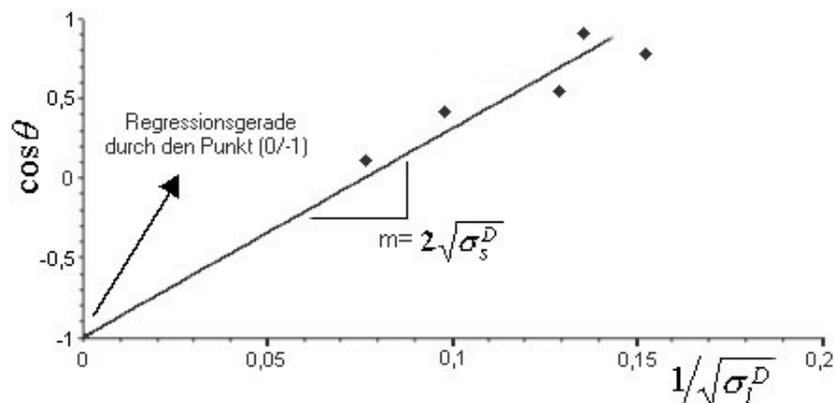


Abbildung 4-24: Bestimmung des dispersen Oberflächenspannungsanteils nach Fowkes

Da die Gesamt-Oberflächenspannung der Flüssigkeit bereits zuvor ermittelt wurde, konnte die polare Oberflächenspannungskomponente vereinfacht mittels Subtraktion durch die disperse Oberflächenspannungskomponente errechnet werden. Das Versuchsprotokoll mit Ergebnissen ist in Tabelle 4-16 angeführt.

Tabelle 4-16: Versuchsprotokoll disperse und polare Oberflächenspannung

	IFT [mN/m]	Vol [ul]	SA [sq mm]	BD [mm]	T [deg.]	CA(M) [deg.]	MH [mm]	MD [mm]
SDM1	41,59	16,54	30,42	1,81	22,53	96,20	3,79	2,81
SDM2	41,63	16,43	30,17	1,82	22,82	97,41	3,74	2,81
SDM3	41,73	16,21	29,73	1,83	22,90	99,33	3,67	2,81
SDM4	42,00	15,95	29,26	1,84	22,97	101,25	3,60	2,81
SDM5	42,06	15,72	28,85	1,85	23,20	102,58	3,54	2,81
SDM6	42,11	15,50	28,48	1,86	23,28	103,64	3,49	2,80
SDM7	41,95	16,03	29,40	1,84	23,20	100,77	3,62	2,81
Mittelwert	41,87	16,05	29,47	1,84	22,98	100,17	3,64	2,81

CA\_PTFE 72,70 deg

SFT	gesamt 41,87	dispers 33,53	polar 8,34 mN/m
-----	-----------------	------------------	--------------------

Der disperse Anteil der Oberflächenspannung beträgt 33,53 mN/m und der polare 8,34 mN/m. Aus diesen Ergebnissen kann über die Oberflächenspannung und dem Kontaktwinkel die kapillare Steighöhe und der Kapillardruck errechnet werden. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass der Kontaktwinkel auf PTFE dem der Innenseite der verwendeten Rohre entspricht.

Die Steighöhe einer Kapillare wird durch folgende Formel berechnet:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{R \cdot \rho \cdot g}$$

Der Kapillardruck ermittelt sich durch:

$$p = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{R}$$

h...Steighöhe der Flüssigkeit

R.. Radius des Rohres

p...Kapillardruck

ρ...Dichte der Flüssigkeit

σ...Oberflächenspannung

g...Erdbeschleunigung

θ...Kontaktwinkel

In Tabelle 4-17 sind die kapillaren Steighöhen von *Marlotherm* mit den in den Versuchen verwendeten Rohrdurchmesser errechnet.

Tabelle 4-17: Kapillarwirkung *Marlotherm*

Durchmesser D [mm]	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	OF-Spannung $\sigma$ [N/m]	Winkel $\vartheta$ [°]	Erdbeschleunigung g [m/s <sup>2</sup> ]	Kapillardruck p [N/m <sup>2</sup> ]	Steighöhe h [m]
0,23	1044	0,04187	72,7	9,81	669,6	0,0654
0,7	1044	0,04187	72,7	9,81	220,0	0,0215
1	1044	0,04187	72,7	9,81	154,0	0,0150
2	1044	0,04187	72,7	9,81	77,0	0,0075
3	1044	0,04187	72,7	9,81	51,3	0,0050
4	1044	0,04187	72,7	9,81	38,5	0,0038

Beträgt bei den Rohren mit 0,23 mm Durchmesser die kapillare Steighöhe noch etwa 6,5 cm liegt die Steighöhe bei 4 mm Durchmesser nur mehr 0,4 cm. Da auch bei dem geringsten verwendeten Rohrdurchmesser und nicht vertikaler Führung des Messrohres maximal ein Kapillardruck von 669,6 N/m<sup>2</sup> (entspricht 669,7 Pa bzw. 0,0067 bar) entsteht, ist bei der Messung von größeren Drücken der Einfluss auf die Messergebnisse vernachlässigbar gering.

Die **Viskosität** des Öles oder Wassers kann aber jedoch Auswirkungen auf das Messergebnis haben. Diese Größe beschreibt die „Zähigkeit“ eines Stoffes. Laut dem in Tabelle 4-13 angeführten Produktdatenblatt hat *Marlotherm* bei 20°C eine kinematische Viskosität  $\nu$  von 47 mm<sup>2</sup>/s.

Nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille kann man das Durchflussvolumen pro Zeiteinheit (V/t) einer Flüssigkeit durch die Parameter Druckdifferenz  $\Delta P$  ( $p_1 - p_2$ ), dynamische Viskosität  $\eta$ , sowie der Länge und dem Radius des Rohres beschreiben.

Die genaue Formel lautet:

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi * r^4 * (p_1 - p_2)}{8 * l * \eta}$$

Die Umrechnung der kinematischen auf die dynamische Viskosität erfolgt durch Multiplikation mit der Dichte (1044 kg/m<sup>3</sup>).

In folgender Tabelle 4-18 wurde nun eine Berechnung des Volumenstromes des Öles in den bei den Versuchen verwendeten Rohrdurchmessern bei einer Druckdifferenz von 1 bar angestellt. Als durchschnittliche Kapillarrohrlänge wurde 300 mm gewählt.

Tabelle 4-18: Volumenstrom durch Kapillarrohre bei einem Druck von 1 bar

Rohrdurchmesser [m]	Radius [m]	kin. Visk. [m <sup>2</sup> /s]	dyn Visk. [kg/ms]	$\Delta P$ [N/m <sup>2</sup> , Pa]	Rohrlänge [m]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom [mm <sup>3</sup> /s]
0,00023	0,000115	0,000047	0,049068	100000	0,3	4,67E-10	0,5
0,0007	0,00035	0,000047	0,049068	100000	0,3	4,00E-08	40,0
0,001	0,0005	0,000047	0,049068	100000	0,3	1,67E-07	166,7
0,002	0,001	0,000047	0,049068	100000	0,3	2,67E-06	2667,7
0,003	0,0015	0,000047	0,049068	100000	0,3	1,35E-05	13505,3
0,004	0,002	0,000047	0,049068	100000	0,3	4,27E-05	42683,5

Darin ist ersichtlich, dass bei einem Rohrdurchmesser von 0,23 mm der Durchfluss selbst bei einem Druck von 1 bar sehr langsam vonstatten geht. Dies hat sich bei dieser Arbeit vor allem beim Füllen dieser Rohre mit Öl gezeigt, das sich äußerst schwierig gestaltete wie in Kapitel 5.2 angeführt ist. Weiters könnte der geringe Volumenstrom auch Auswirkungen auf die Messergebnisse haben, da der Druck erst verzögert weitergegeben wird. Deshalb sollten eher Rohrdurchmesser ab 0,7 mm verwendet werden.

## 4.6 Brandofen

Für die Brandversuche wurde ein bereits bestehender Brandofen verwendet. Er besteht aus einem Stahlrahmen mit betonierter Bodenplatte und einer zweischaligen Wandkonstruktion. Die Innenschale der Wandkonstruktion besteht aus 12,5 cm starken Feuerfeststeinen und die Außenschale aus 10 cm starken Ytong-Steinen. Als Trennung beider Schalen fungiert eine 3-lagige Schicht von Silikatmatten mit 3,5 cm Stärke. Der Boden ist mit Silikatmatten ausgelegt und mit Ytong-Steinen ausgemauert. Die Brandkammer hat Abmessungen von 122 x 55 x 85 cm und weist Öffnungen für den Brenner und zur Belüftung auf (siehe Abbildung 4-25).

## CORPTUS - OFEN

Version 2  
Gewicht ca. 2,3 t

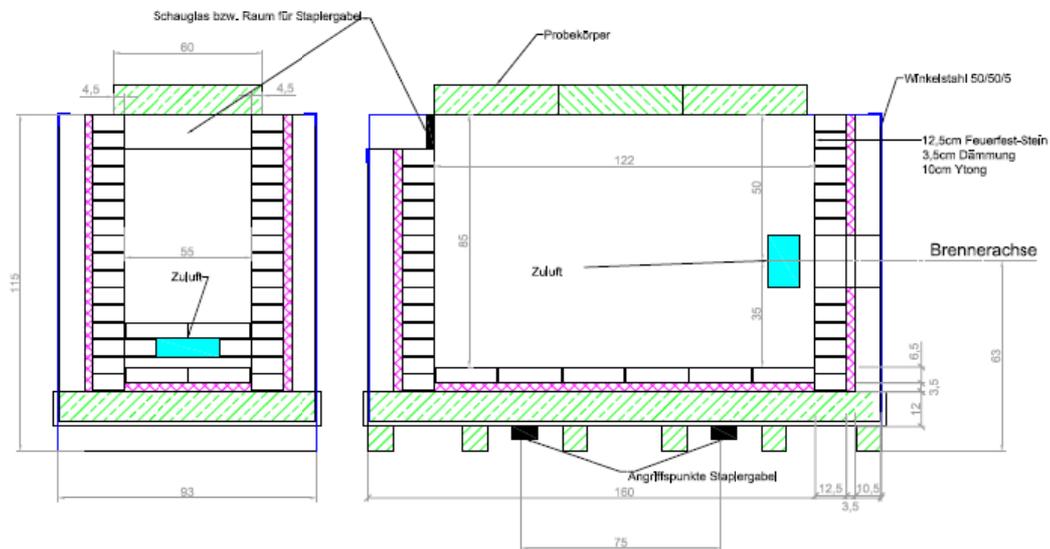


Abbildung 4-25: Versuchsbrandofen (C.W. Baierl S.47 [13])

### 4.7 Brenner

Es wurde für die Versuche ein Brenner der Fa. *Olymp* verwendet mit einem Verbrauch von ca. 65 l Heizöl-leicht pro Stunde unter voller Brennleistung. Das Öl wird mittels Druckluftzerstäubung in den Brenner eingebracht und dort gezündet. Mittels einer Steuereinrichtung kann die jeweilige Temperaturkurve eingestellt werden. Ein Foto des Brenners ist in Abbildung 4-26 zu sehen.



Abbildung 4-26: Brenner Fa. *Olymp*

## 4.8 Messtechnik Druck

### 4.8.1 Rohrfedermanometer

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Druckmessung Rohrfedermanometer mit Luft oder Ölfüllung verschiedener Firmen verwendet.

Rohrfedern sind kreisförmig gebogene Rohre von ovalem Querschnitt. Der Druck des Messstoffes wirkt auf die Innenseiten dieses Rohres, wodurch sich der Ovalquerschnitt der Kreisform annähert. Durch die Krümmung des Federrohres entstehen Ringspannungen, welche die Rohrfeder aufbiegen (Bourdonprinzip). Das nicht eingespannte Federende führt eine Bewegung aus, die ein Maß für den Druck ist. Über ein Zeigerwerk wird diese Bewegung zur Anzeige gebracht. Die kreisförmigen, in einem Winkel von ca. 250 ° gebogene Federn werden für Drücke bis ca. 60 bar eingesetzt (*der-brunnen.de* [49]). Der schematische Aufbau eines Rohrfedermanometers ist in Abbildung 4-27 dargestellt.

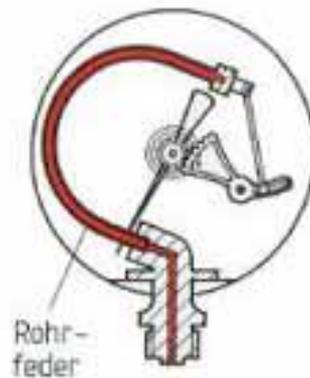


Abbildung 4-27: Schematischer Aufbau Rohrfedermanometer (*der-brunnen.de* [49])

### 4.8.2 Drucksensoren

Bei den in Kapitel 3 angeführten Forschungsarbeiten wurde die Druckmessung großteils durch **piezoelektrische Drucksensoren** durchgeführt. Bei einem piezoelektrischen Sensor wird mittels Druck durch Ladungstrennung eine elektrische Spannung in einem Kristall erzeugt. Dies nennt man den piezoelektrischen Effekt. Durch Druck verschieben sich im Inneren des Kristalls Ionen, wodurch sich die Ladung proportional zur Kraft verändert (Wikipedia [50]).

Da diese Sensoren grundsätzlich nur Kräfte messen, muss über eine Membran der Druck proportional in eine Kraft umgewandelt werden um für Druckmessungen verwendet werden zu können.

## 4.9 Messtechnik Temperatur

Der Temperaturanstieg im Beton wurde durch die einbetonierten Thermoelemente in bestimmten Tiefen aufgezeichnet, die über Verkabelungen mit einer *Keithley*-Messdatenaufzeichnungseinheit im Laborgebäude verbunden waren. An diese Messdatenaufzeichnungseinheit wurden zur Kontrolle der Brandraumtemperatur 2 NiCr-Ni Mantelthermoelemente ca. 10 cm unter die Prüfkörper angebracht, um den Temperaturanstieg während des Versuches verfolgen und eventuell auch beeinflussen zu können. Weiters wurde die Oberflächentemperatur des Betonkörpers gemessen.

Eine Darstellung der Messeinrichtung für die Temperatur ist in Abbildung 4-28 zu sehen.

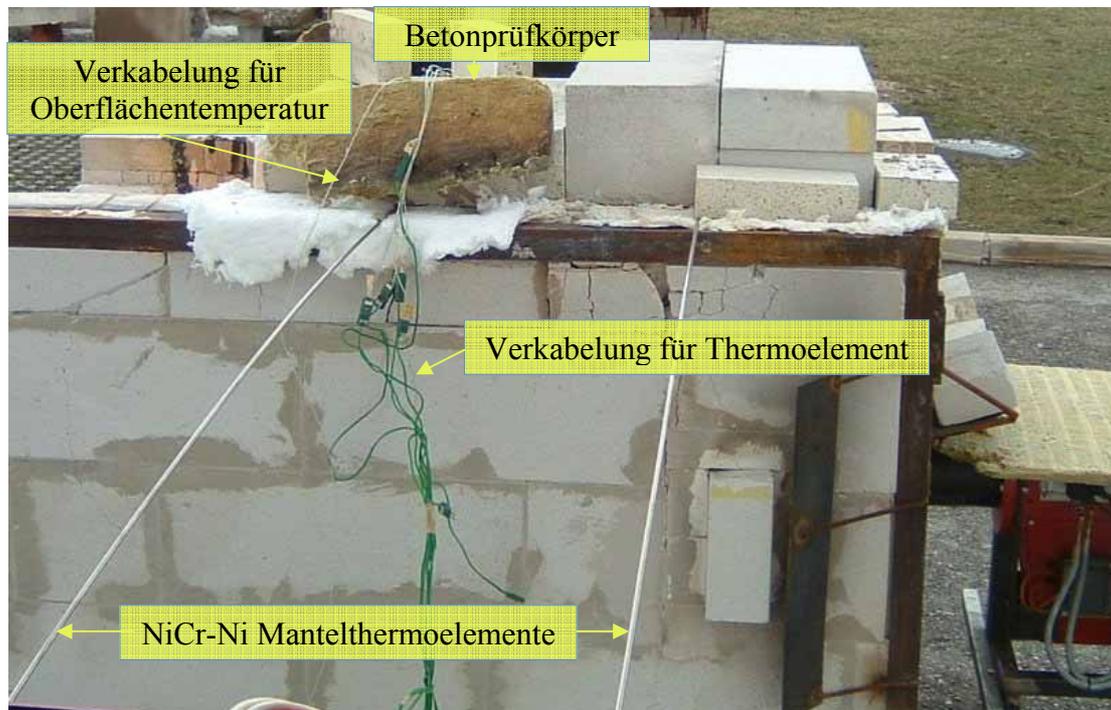


Abbildung 4-28: Messeinrichtung Temperatur

Die gesamten Temperaturdaten wurden auf einem institutseigenen Notebook über eine Software der Fa. *Keithley* visualisiert (siehe Abbildung 4-29).

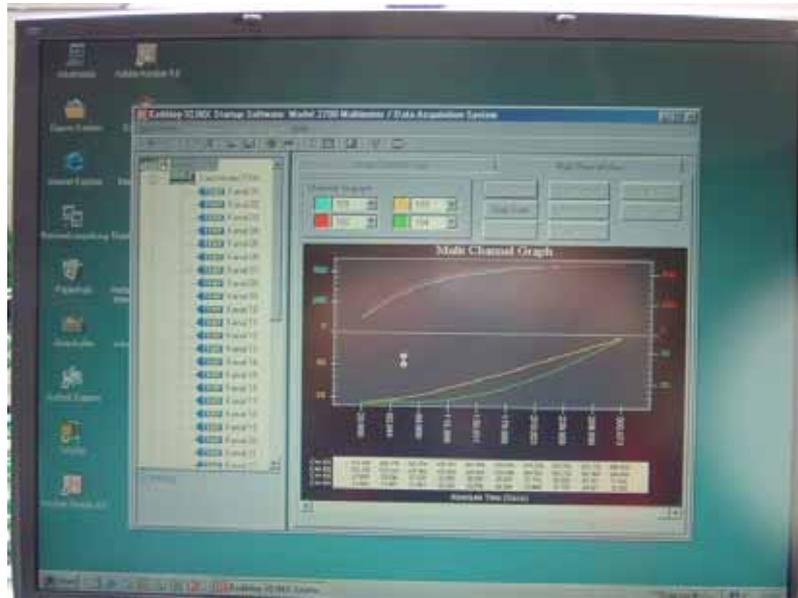


Abbildung 4-29: Temperaturaufzeichnung

Die Ergebnisse der Temperaturverläufe wurden durch das Softwareprogramm *MS-Excel* in Diagrammform übersichtlich bearbeitet und abgespeichert.

## 5 Versuche zur Entwicklung eines Messaufbaues und Ergebnisse

### 5.1 Vorversuche 00

Diese wurden mit 3 Platten mit 12 cm Dicke und der Mischung RK 01\* durchgeführt.

Die ersten Versuche dienten zum Kennenlernen der Messapparatur und der Arbeitsabläufe, sowie der Prüfung ob bei der Mischung RK 01\* wirklich keine Abplatzungen auftreten. Sie wurden gemeinsam mit meinem Kollegen *Christoph Kosch* durchgeführt. Dabei waren noch keine Druckmessungen vorgesehen. Deshalb werden sie an dieser Stelle auch nur kurz erwähnt und exemplarisch der Temperaturverlauf der Platte KM-VV-12-2 RK 01\* angeführt.

#### Brandversuch Platte KM-VV-12-2 RK 01\*

Platte: KM-VV-12-2 RK 01\*

Datum: 06.12.2006

Temperaturkurve: ETK

Dauer: 33 min

#### Temperaturverlauf

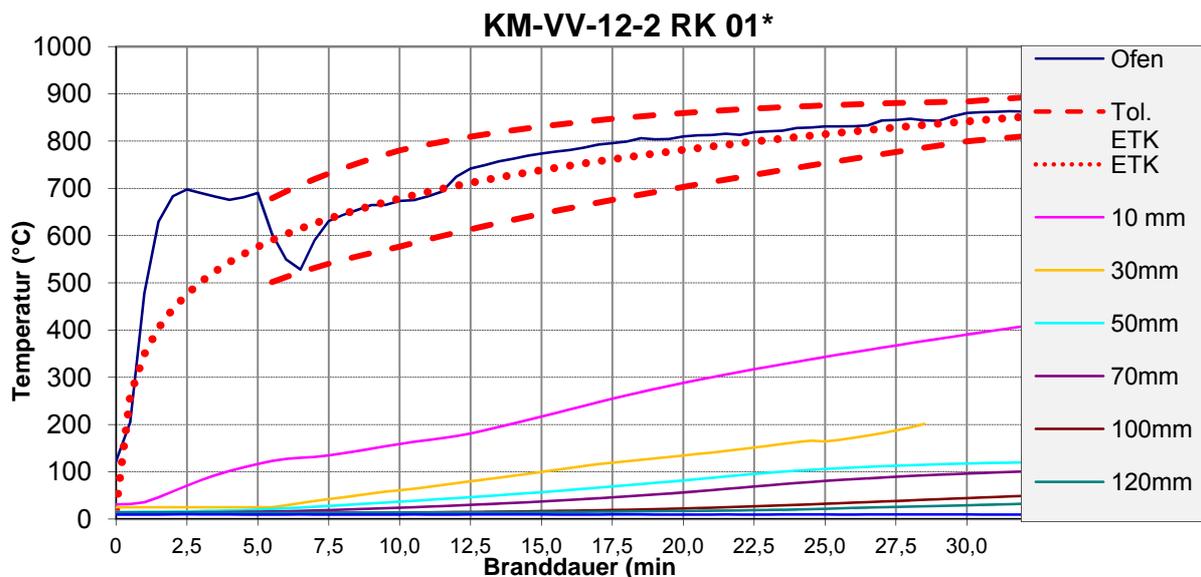


Abbildung 5-1: Temperaturverlauf Platte VV-12-2 RK 01\*

Masse vor Brandversuch: 86,50 kg

Masse nach Brandversuch: 84,85 kg

Masseänderung in Prozent: - 1,91 %

Wassergehalt der Platte: 3,70 M-%

### **Beobachtungen**

5. Minute      Zu starker Temperaturanstieg lt. ETK, Temperaturregelung

7. Minute      Markante Wasserabsonderungen an der Seitenfläche der Platte (in Abbildung  
5-2 zu sehen)

Während der gesamten Versuchsdauer waren keine Abplatzgeräusche hörbar

### **Erkenntnisse und Ergebnisse**

Der Toleranzbereich der ETK konnte durch manuelle Regelung nach anfänglich zu hohem Temperaturgradienten weitgehend eingehalten werden (siehe Abbildung 5-1).

Die Mischung RK 01\* entspricht der Anforderung, dass keine Abplatzungen auftreten (siehe Abbildung 5-2).



Abbildung 5-2: Platte KM VV 12-2 RK 01 nach dem Brandversuch

## 5.2 Versuche 1

### Herstellung und Überlegungen

Bei der Herstellung der 8 Betonplatten die für die Hauptversuche geplant waren sind pro Platte zwei mit Öl gefüllte Kapillarrohre eingebracht worden (siehe Abbildung 5-3).



Abbildung 5-3: Kapillarrohre in Frischbeton

Die Kapillarrohre hatten einen inneren Durchmesser von 0,23 mm, um möglichst im Kapillarbereich des Betons den Druck messen zu können. Sie wurden auf in etwa 15 bis 20 cm mittels einer Feile abgelängt, um die Kapillare nicht zu verschließen. Das Füllen mit Öl erfolgte durch eine handelsübliche Spritze. Da es für diese kleinen Durchmesser keine Nadeln mehr im normalen Verkauf gibt, wurde das Öl durch das Rohr „gesaugt“. Die Abdichtung der Spritzenöffnung erfolgte mit einer gummiähnlichen Masse (getrockneter Klebstoff). Dieser Vorgang ist in Abbildung 5-4 zu sehen.



Abbildung 5-4: Füllen der Kapillarrohre

Dieser Vorgang nahm pro Rohr einige Minuten in Anspruch und gestaltete sich aufgrund der Viskosität des Öles bei einem Durchmesser von 0,23 mm als äußerst schwierig (vergl. Kap. 4.5). Eine Füllung der Rohre alleine durch die Kapillarkräfte hätte mehrere Stunden gedauert und wurde aus Zeitgründen unterlassen.

Für jede Mischung sollten bis 35 mm unter die Oberfläche Messungen des Porendruckes durchgeführt werden. Durch die beschränkte Anzahl von zwei Manometern wurden die Kapillarrohre bis in die in Tabelle 5-1 angegebenen Tiefen in den Beton eingeführt.

Tabelle 5-1: Messtiefen Kapillarrohre 0,23 mm

Platte	Mischung	Messtiefe [mm]	Messtiefe [mm]
<b>M-HV10-1</b>	RK 02	5	15
<b>M-HV10-2</b>	RK 02	15	25
<b>M-HV10-3</b>	RK 02	25	35
<b>M-HV10-4</b>	RK 02	35	5
<b>M-HV10-5</b>	RK 01	5	15
<b>M-HV10-6</b>	RK 01	15	25
<b>M-HV10-7</b>	RK 01	25	35
<b>M-HV10-8</b>	RK 01	35	5

Zu diesem Zwecke wurden sie mit den Daumen verschlossen, damit kein Öl verlorengehen konnte und langsam in die frisch betonierten Platten eingeschoben. Durch diese Vorgangsweise ist jedoch das Risiko einer Verschleißung des Rohrendes durch Zementleim sehr hoch und sollte bei zukünftigen Versuchen anders gelöst werden. Die richtige Höhenlage der Rohre wurde durch ein Fähnchen aus Klebeband bewerkstelligt, das ein Einsinken des Rohres unter die Betonoberfläche verhinderte. Um eine Verschmutzung der Rohröffnung zu verhindern wurde diese mit einem Textilklebeband verschlossen. Danach wurden die Platten 7 Tage im Wasserbad und danach trocken gelagert.

Um das Entweichen von Luft, bzw. Dampf entlang des Kapillarrohres während der Brandversuche zu verhindern, wurde die Hochtemperaturdichtpaste *VP 18499* der Firma *IGP* aufgebracht (siehe Abbildung 5-5). *VP 18499* ist ein mit Graphit versehenes, pastöses Produkt, welches insbesondere bei Dauertemperaturen bis 750° C als Dichtkleber seinen Einsatz findet (*IGP* Technisches Produktdatenblatt [12]).



Abbildung 5-5: Abdichten der Betonoberfläche

### Messeinrichtung

Als Manometer wurden zwei Produkte der Firma *Swagelok* verwendet, die einen Messbereich bis 100 bar aufweisen und sowohl mit Öl als auch mit Luft gefüllt werden können (siehe Abbildung 5-6).



Abbildung 5-6: Manometer bis 100 bar

Diese Manometer wurden mittels Rohrverschraubungen, Rohrstücken, Adapter und Klemmrings mit den einbetonierten Kapillarrohren luftdicht verbunden. Die Dichtheit wurde

einerseits durch Verschraubungen, andererseits durch das Klemmringsystem der Firma *Swagelok* gewährleistet (siehe Abbildung 5-7).

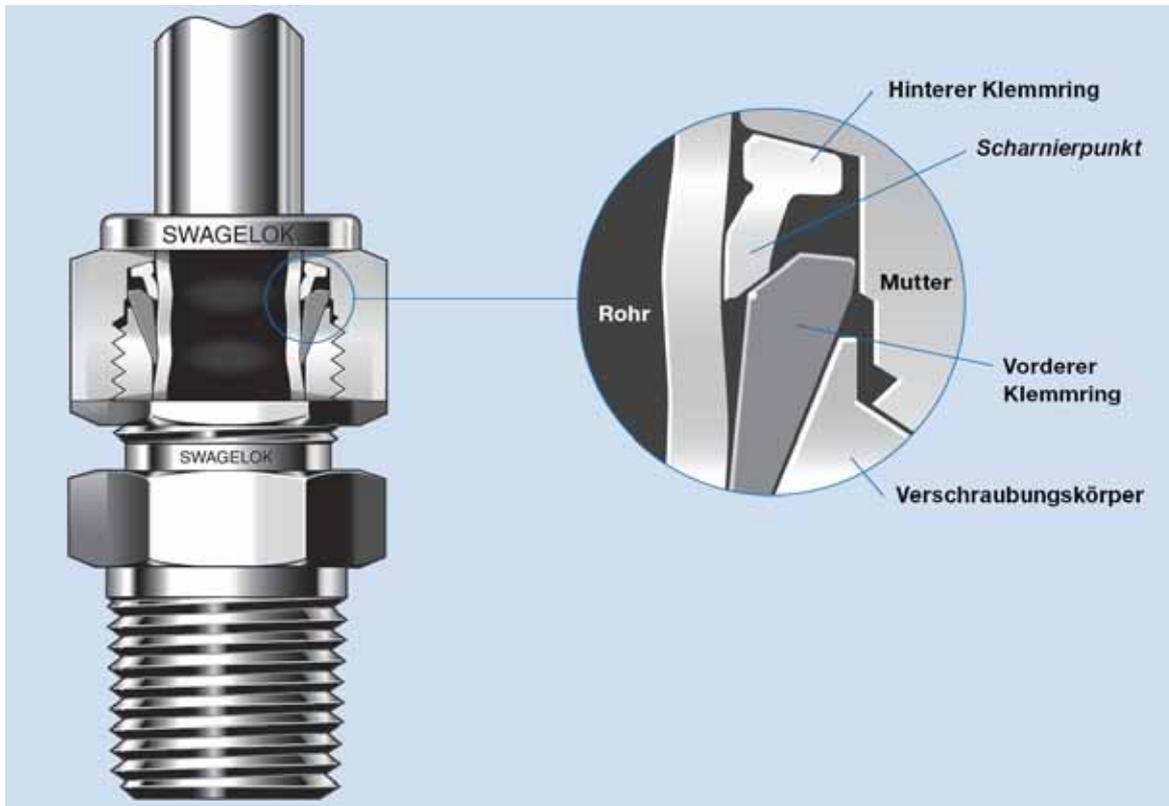


Abbildung 5-7: Klemmringsystem *Swagelok* (*Swagelok* S. 2 [29])

Bei diesem System mit zwei Klemmringen wird bei der Montage der vordere durch den hinteren Klemmring in den Verschraubungskörper und die Rohrleitung gepresst. Dadurch entsteht die Primärdichtung während der hintere Klemmring die Rohrleitung radial festklemmt.

Es wurden zwei Varianten für den Anschluß des Manometers an das Kapillarrohr in den ersten Versuchen getestet:

### Messvorrichtung 1

Als erste Idee sollte in dem fertig montierten Messgerät durch einen Hahn mittels einer Vakuumpumpe ein Unterdruck hergestellt werden. Durch den anderen Hahn sollte nach schließen des „Pumpenhahnes“ der Hohlraum aufgefüllt werden, um möglichst keine Lufteinschlüsse von der Kapillarrohröffnung im Beton bis zum Manometer zu haben, denn

Luftblasen würden aufgrund ihrer Kompressibilität das Messergebnis verfälschen. Die dafür gedachte Messeinrichtung ist in Abbildung 5-8 in nicht zusammengesraubtem Zustand dargestellt.



Abbildung 5-8: Messeinrichtung 1

Diese Möglichkeit des Füllens durch Evakuieren musste nach einem Versuch jedoch aufgegeben werden, da die Institutseigene Vakuumpumpe bei weitem zu schwach dafür war, um einen ausreichend großen Unterdruck zu erzeugen um die Hohlräume ganz ausfüllen zu können.

### Messvorrichtung 2

Im nächsten Schritt wurden die Hähne abmontiert und das Manometer mit einem Rohradapter auf Kapillarrohrgröße zusammengesraubt (siehe Abbildung 5-9).



Abbildung 5-9: Messeinrichtung 2

Durch eine Spritze mit Nadel wurde die Messeinrichtung auf den Kopf stehend mit Öl gefüllt. Die Textilklebebänder auf den Kapillarrohren wurden entfernt und danach die Messeinrichtung auf das Rohr aufgesetzt und so schnell wie möglich verschraubt damit kein Öl austritt. Die fertig montierte Messvorrichtung ist in Abbildung 5-10 zu sehen.



Abbildung 5-10: Fertig montierte Messvorrichtung 2

Mit dieser Messvorrichtung wurden mit 2 Platten Brandversuche durchgeführt.

### 5.2.1 Brandversuch 1

Platte M-HV10-1 RK 02

Messtiefe: 5 und 15 mm

Datum: 12.01.2007

Temperaturkurve: ETK

Dauer: 17 min

## Temperaturverlauf

### MHV 10-1 RK 02

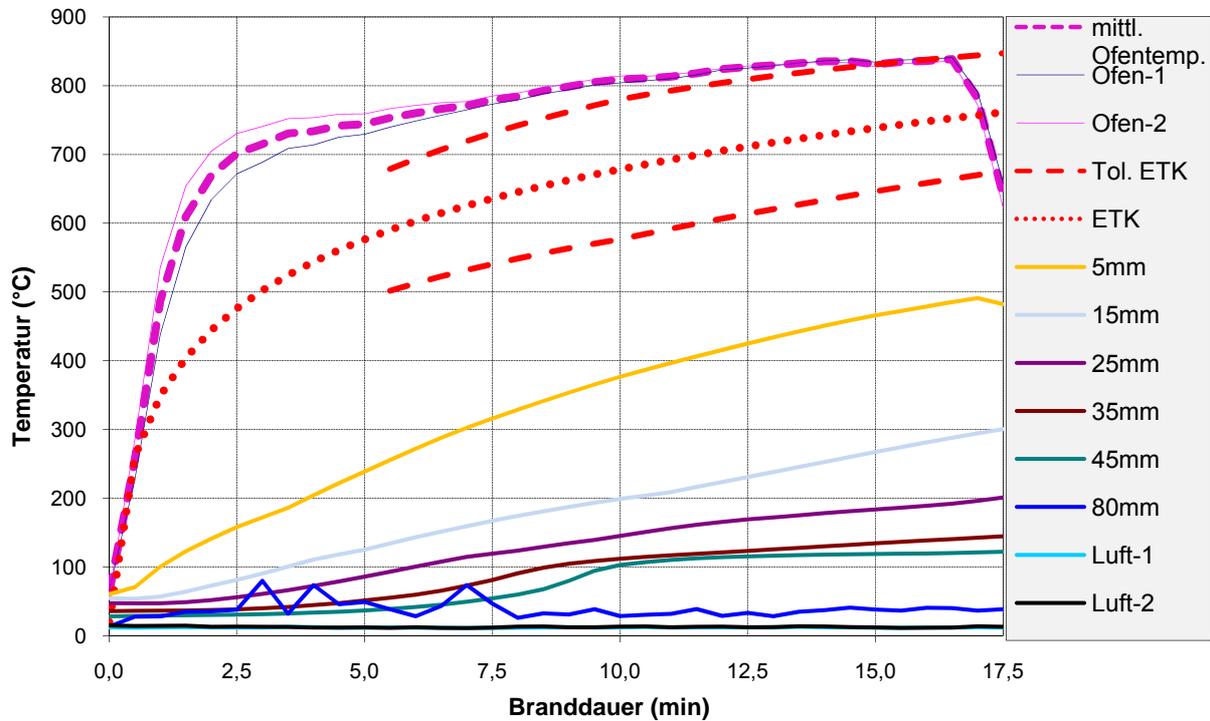


Abbildung 5-11: Temperaturverlauf M-HV10-1 RK 02

Masse vor Brandversuch: 69,80 kg

Masse nach Brandversuch: 67,35 kg

Masseänderung in Prozent: - 3,51 %

Wassergehalt der Platte: 6,59 M-%

### Beobachtungen

- |           |  |
|-----------|--|
| 3. Minute | erste Abplatzgeräusche hörbar  |
| 5. Minute | Beginnender Wasseraustritt an den Seitenflächen                                  |
| 6. Minute | Ende der Abplatzungen  |
| 7. Minute | Verflüssigung der Hochtemperaturdichtpaste, Blasenbildung (siehe Abbildung 5-12) |



Abbildung 5-12: Blasenbildung bei der Dichtmasse an Platte M-HV10-1 RK 02

17. Minute                      Versuchsabbruch

Keine Anzeige der Manometer während des ganzen Versuches

Es waren drei großflächigere Abplatzstellen auf der Platte nach dem Versuch feststellbar, wie in Abbildung 5-13 erkennbar ist. Die Abplatzungen befinden sich in unmittelbarer Nähe der Kapillarrohre, wodurch ein markanter Druckanstieg auf jeden Fall zu erwarten gewesen wäre.



Abbildung 5-13: Platte M-HV10-1 RK 02 nach Brandversuch

Die Versuchsbrandkurve lag während des gesamten Versuches deutlich oberhalb des Toleranzbereiches der ETK (siehe Abbildung 5-11).

## Erkenntnisse und Ergebnisse

Es konnten bei diesem Versuch keine Drücke an den Manometern abgelesen werden. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die Hochtemperaturdichtpaste erst unmittelbar vor dem Versuch aufgebracht wurde und so das System undicht war, was sich in weiterer Versuchsfolge aber nicht als alleiniger Grund herausstellte.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Manometer mittels Druckluft auf Funktionstüchtigkeit überprüft und festgelegt, dass für die nächsten Versuche die Hochtemperaturdichtpaste drei Tage vor dem Versuch aufgebracht wird, um eine vollständige Aushärtung zu gewährleisten.

### 5.2.2 Brandversuch 2

Platte M-HV10-2 RK 02

Messtiefe: 15 und 25 mm

Datum: 15.01.2007

Temperaturkurve: ETK

Dauer: 21 min

### Temperaturverlauf

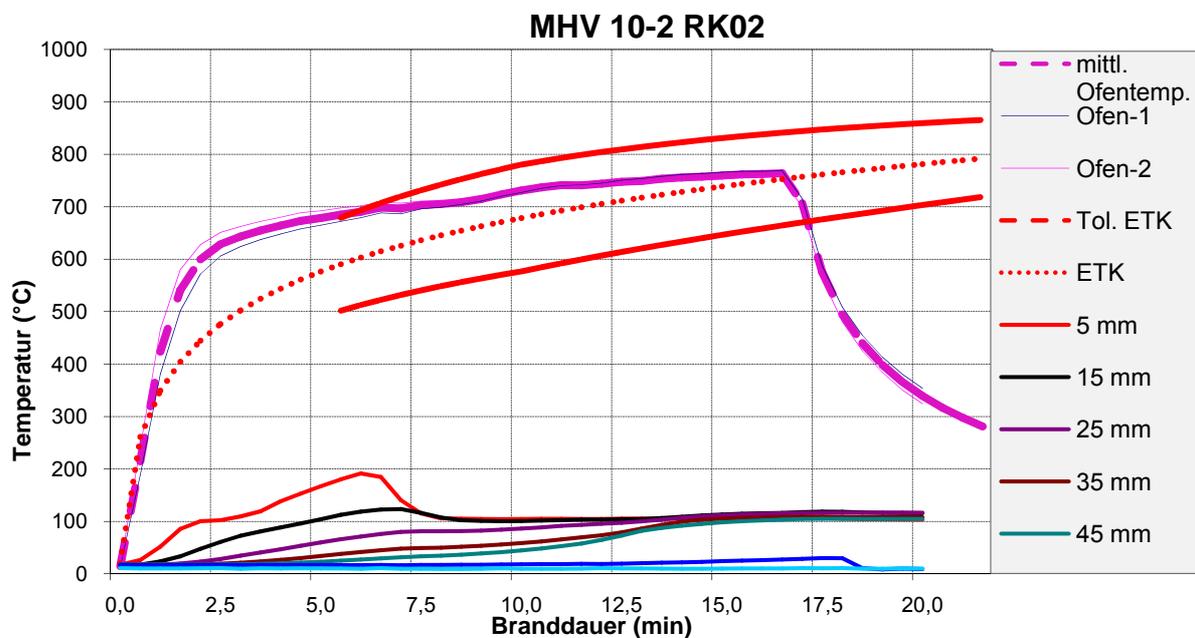


Abbildung 5-14: Temperaturverlauf Platte MHV10-2 RK 02

Masse vor Brandversuch: 69,30 kg

Masse nach Brandversuch: 67,80 kg

Masseänderung in Prozent: - 2,16 %

Wassergehalt der Platte: 5,00 M-%

### **Beobachtungen**

5. Minute                    Beginnender Wasseraustritt an den Seitenflächen

10. Minute                Verflüssigung der Hochtemperaturdichtpaste, Blasenbildung

21. Minute                Versuchsabbruch

Keine Anzeige der Manometer während des ganzen Versuches.

Keine Abplatzgeräusche hörbar und auch kaum Anzeichen von Abplatzungen (siehe Abbildung 5-15).



Abbildung 5-15: Platte M-HV10-2 RK 02 nach Brandversuch

Der Toleranzbereich der ETK konnte weitgehend eingehalten werden (siehe Abbildung 5-14), jedoch war die Temperaturaufzeichnung in den verschiedenen Tiefenstufen nach etwa 6 Minuten aufgrund eines technischen Gebrechens fehlerhaft.

### **Erkenntnisse und Ergebnisse**

Dass bei diesem Versuch keine Abplatzungen aufgetreten sind könnte durch den etwas geringeren Wassergehalt der Platte im Vergleich zu Brandversuch 1 hervorgerufen worden sein.

Bis zu dem Zeitpunkt wo die Hochtemperaturdichtpaste flüssig wurde, sollte laut vorhandener Literatur bereits eine Anzeige abgelesen werden können. Da dies nicht der Fall war, wird vermutet, dass die Hauptursache der fehlenden Ergebnisse in der Messanordnung liegt. Möglicherweise wurde durch das Einbringen der Kapillarrohre in den Frischbeton die Rohröffnung durch Feinanteile verschlossen, sodass keine Druckmessungen möglich sind. Ausserdem wurde auch für möglich erachtet, dass der geringe Rohrdurchmesser von 0,23 mm eine Auswirkung auf die Druckweiterleitung des Öles durch die Kapillarwirkung haben könnte. Deshalb wurde eine neue Versuchsanordnung entwickelt, die im folgenden Unterkapitel 5.3 behandelt wird.

## **5.3 Versuch 2**

### **Überlegungen**

Um einen Verschluss des Kapillarrohres durch Feinanteile zu verhindern, wurde bei diesem Versuch das untere Ende eines Rohres mit einer Blähtonkugel von etwa 8 mm Durchmesser versehen. In diese Kugeln wurde ein Loch in der Stärke des Außendurchmesser des Kapillarrohres gebohrt. Die Rohre wurden mit Superkleber benetzt und durch das zuvor gebohrte Loch bis ca. in Mitte der Kugel eingeführt (siehe Abbildung 5-16).

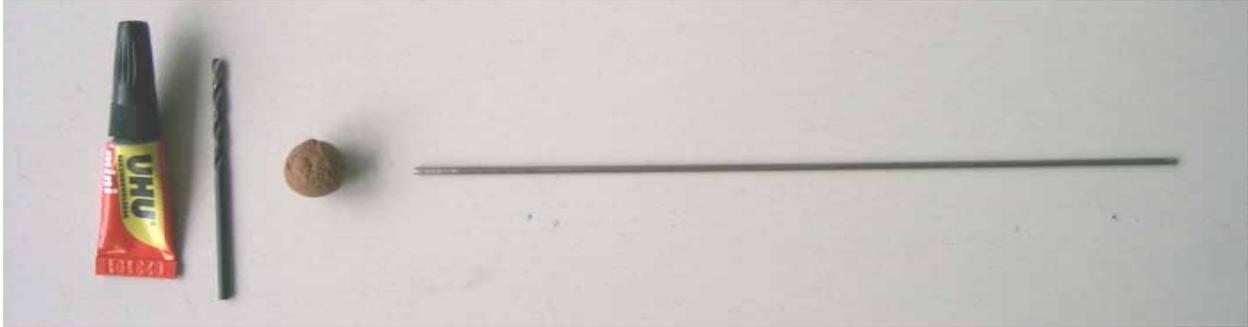


Abbildung 5-16: Schutz der Kapillarrohröffnung vor Verlegung

Um den möglichen Einfluss des geringen Durchmessers des Kapillarrohres der Versuche zuvor auszuschalten, wurden bei dieser Messanordnung Kapillarrohre mit 0,7 mm Durchmesser verwendet. Damit keine weiteren für die Hauptversuche gedachten Platten ohne Ergebnis zerstört werden mussten, wurde für diesen Versuch auf eine für ein anderes Forschungsprojekt hergestellte 12 cm dicke Platte aus hochfestem Beton zurückgegriffen. Diese wurde mit dem Bindemittel Slagstar der Firma Wopfinger hergestellt und war zum Zeitpunkt des Versuches ca. 6 Monate alt.

In diese Platte wurden zwei vertikale Löcher  $\varnothing$  12 mm bis in eine Tiefe von ca. 9,5 cm gebohrt. Die Kapillarrohre wurden mit Öl gefüllt und in die Löcher eingebracht. Ausgefüllt wurde das Loch mit einer Zementschlämme. Nach einem Tag Erhärten der Zementschlämme wurde das Loch zusätzlich mit der Hochtemperaturdichtpaste *VP 18499* verschlossen. Der Brandversuch mit dieser Platte erfolgte 3 Tage nach durchgeführter Abdichtung.

### **Brandversuch**

Platte: M-Versuch 2 (alte Bezeichnung: Platte 35 HO)

Messtiefe: 25 mm

Datum: 19.01.2007

Temperaturkurve: ETK

Dauer: 21 min + 22 min

## Temperaturverlauf

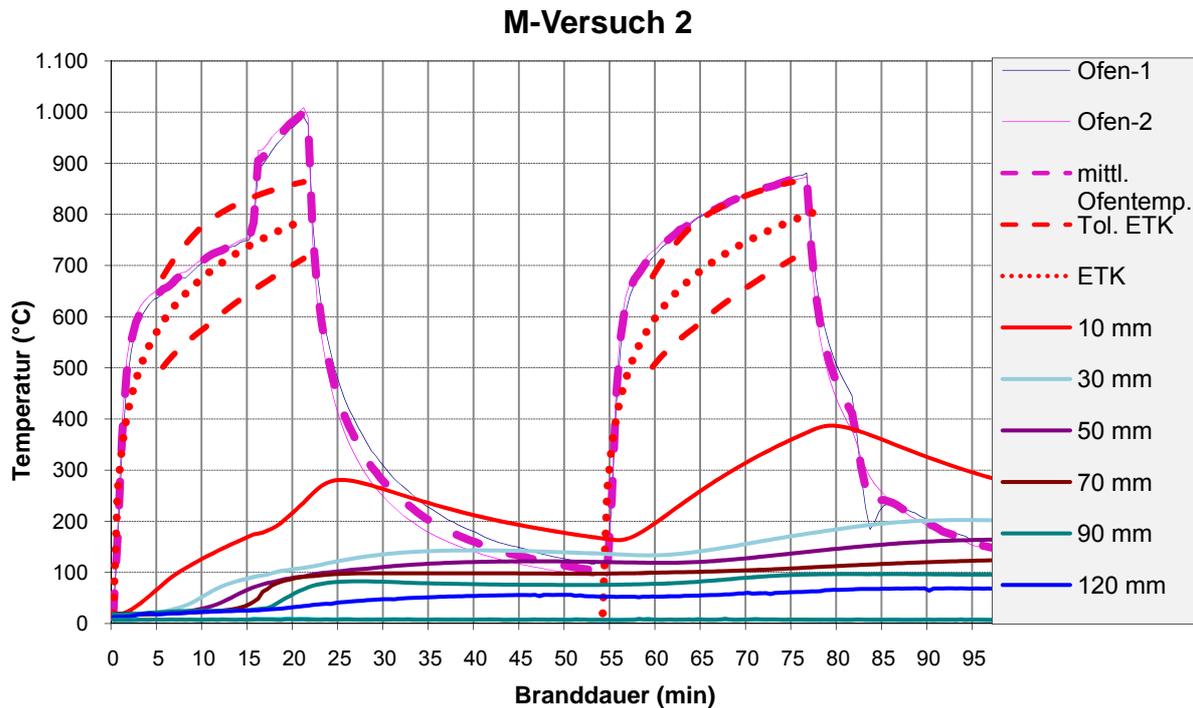


Abbildung 5-17: Temperaturverlauf Platte M-Versuch 2

Masse vor Brandversuch: 86,45 kg  
Masse nach Brandversuch: 84,70 kg  
Masseänderung in Prozent: - 2,02 %  
Wassergehalt der Platte: 2,83 M-%

### Beobachtungen

4. Minute            Beginnender Wasseraustritt an den Seitenflächen  
11. Minute        Verflüssigung der Hochtemperaturdichtpaste, Blasenbildung  
21. Minute        Versuchsabbruch

- Keine Anzeige der Manometer während des Versuches.
- Keine Anzeichen von Abplatzungen.

Die Manometer wurden abmontiert, mit Druckluft gereinigt und nur mit Luft gefüllt wieder an die Kapillarrohre angebracht, um zu überprüfen ob die Füllung mit Öl eine Auswirkung

auf die Ergebnisse der Messmanometer haben kann. Nach 33 Minuten Pause erneuter Start des Versuches.

54. Minute	Erneuter Start des Versuches
76. Minute	Versuchsabbruch ohne Ergebnis

### **Erkenntnisse und Ergebnisse**

Weder mit Ölfüllung noch mit Luftfüllung konnte ein Messergebnis für den Kapillarporendruck abgelesen werden. Es ist deutliche Luftblasenbildung der Dichtmasse und somit ein Druckverlust in der Platte beobachtbar. Laut Produktdatenblatt müsste die Hochtemperaturpaste jedoch Temperaturen bis 750°C standhalten, und relativ wasserfest sein (*IGP* Technisches Produktdatenblatt [12]). Deshalb wurde nach diesem Versuch angenommen, dass das Produkt gegen hohe Temperaturen in Verbindung mit Wasserdampf nicht beständig ist.

Um dennoch mit diesem Produkt weitere Versuche ohne größeren Zeitverlust durchführen zu können wurde eine weitere Versuchsanordnung entwickelt, bei der die Dichtmasse geringeren Temperaturen ausgesetzt ist.

## **5.4 Versuch 3**

### **Überlegungen**

Um die Temperaturbelastung auf die Hochtemperaturdichtpaste zu reduzieren, wurde für diesen Versuch eine horizontale Führung der Kapillarrohre in die Platte festgelegt, da die Temperaturen an den Seitenflächen der Platte während der Versuche deutlich geringer sind als an der Deckfläche. Dazu wurde eine 6 Monate alte bestehende Platte des *CORPTUS*-Projektes mit drei horizontalen Löchern  $\varnothing$  12 mm und ca. 10 cm tief versehen. Der Abstand der Löcher von der zu beflamenden Oberfläche betrug 2,5 cm. In das mittlere Loch wurde die selbe Anordnung wie in Versuch 2 mit der Blähton-Kugel als Verschlussicherung verwendet. Für die anderen beiden Löcher wurden Manometer mit einem kleineren Messbereich und Kapillarrohre mit 1 mm Durchmesser angebracht, an denen ebenfalls die Verschlussicherung angebracht wurde..

Das in Abbildung 5-18 gezeigte Manometer hat einen Messbereich von 0 bis 10 bar und wird in einem luftgefüllten System verwendet.



Abbildung 5-18: Manometer, Messbereich 0-10 bar

Das in Abbildung 5-19 ersichtliche Manometer hat einen Messbereich von 0 bis 6 bar, wird in einem ölgefüllten System verwendet und weist aufgrund seiner Größe eine sehr gute Ablesegenauigkeit auf.



Abbildung 5-19; Manometer, Messbereich 0-6 bar

Die Löcher wurden abermals mit Zementschlämme aufgefüllt und nach deren Erhärten mit der Hochtemperaturdichtpaste verschlossen. Nach 9 Tagen Erhärten und Trocknen wurde der Brandversuch 4 durchgeführt. Die Anordnung der Manometer und des Versuches ist in Abbildung 5-20 dargestellt.



Abbildung 5-20: Anordnung Manometer Versuch 4

**Brandversuch:**

Platte M-Versuch 3 (alte Bezeichnung: Platte 36 HO)

Messtiefe: 25mm

Datum: 09.02.2007

Temperaturkurve: ETK

Dauer: 56 min

## Temperaturverlauf

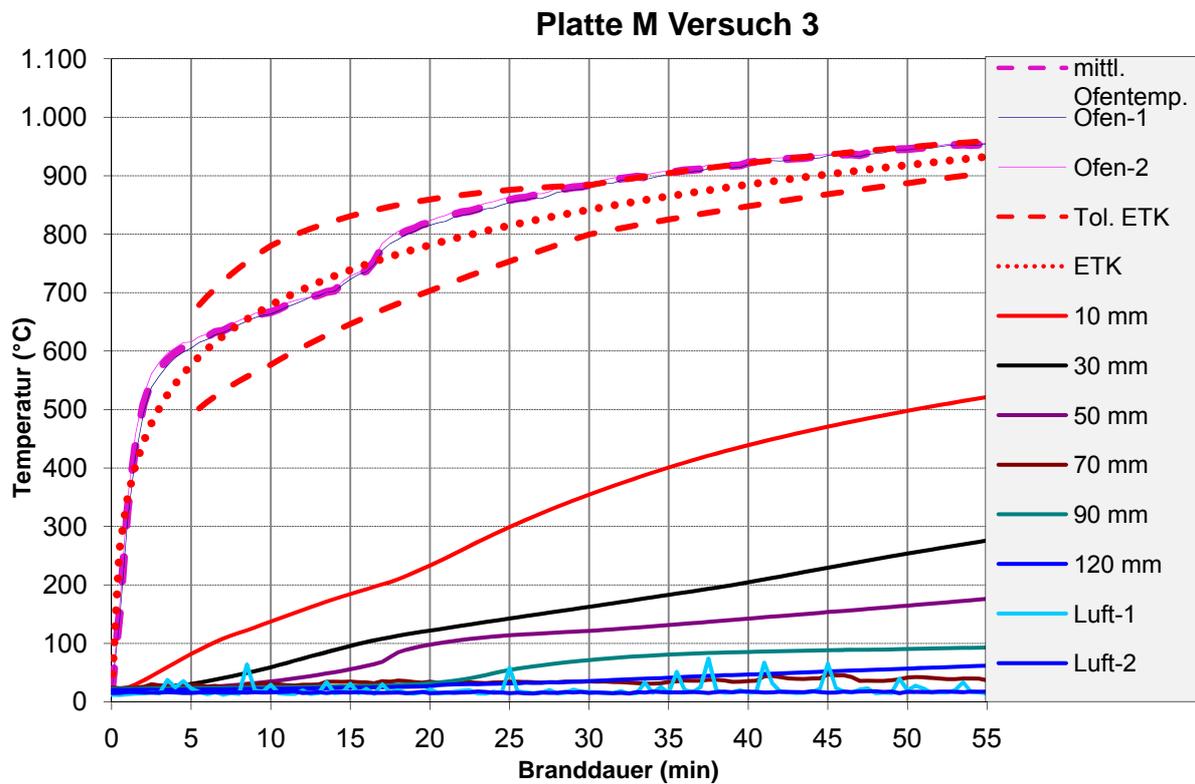


Abbildung 5-21: Temperaturverlauf der Platte M-Versuch 3

Masse vor Brandversuch: 85,55 kg  
Masse nach Brandversuch: 82,60 kg  
Masseänderung in Prozent: - 3,44 %  
Wassergehalt der Platte: 3,22 M-%

### Beobachtungen:

- 5. Minute Beginnender Wasseraustritt an den Seitenflächen
- 18. Minute Verflüssigung der Hochtemperaturdichtpaste, beginnend beim brennerfernten Manometer, massive Blasenbildung (siehe Abbildung 5-22).



Abbildung 5-22: Blasenbildung der Dichtpaste bei Platte M-VV-04

21. Minute Verflüssigung der Hochtemperaturdichtpaste des mittleren Manometers

25. Minute Dichtpaste an allen 3 Stellen flüssig

27. Minute langsamer Anstieg der Anzeige des rechten Manometers auf 0,1 bar

29. Minute langsamer Abstieg der Anzeige des rechten Manometers auf 0,0 bar

In den nächsten Minuten ist ein regelmäßiger Anstieg und Abstieg des Druckes zwischen 0,0 und 0,1 bar erkennbar.

39. Minute gleichbleibende Anzeige auf allen 3 Manometern 0,0 bar

56. Minute Versuchsabbruch

Unmittelbar nach Versuchsende wurde die Oberflächentemperatur im Bereich der Dichtpaste mit einem Infrarotmessgerät ermittelt. Dies ergab Temperaturen von maximal 140 °C.

Der Toleranzbereich der ETK konnte 30 Minuten eingehalten werden und wurde danach teilweise um maximal 2 °C überschritten (siehe Abbildung 5-21).

Es gab keine Anzeichen von Abplatzungen (siehe Abbildung 5-23).



Abbildung 5-23: Platte M-VV-03 nach dem Brandversuch

### **Erkenntnisse und Ergebnisse**

Dieser Versuch hat gezeigt, dass die verwendete Dichtmasse für diese Versuche ungeeignet ist, denn selbst bei Temperaturen unter 140 °C kann keine Dichtheit erzielt werden.

Die kommenden Versuche in einem schwer abplatzenden Prüfkörper müssen auf jeden Fall über 30 Minuten durchgeführt werden, da erst ab der 27. Minute ein Anstieg des Druckes messbar war.

Der schwankende Druck weist darauf hin, dass selbst kleine Drücke von 0,1 bar aus dem Messsystem entweichen können und so ein kontinuierlicher Druckaufbau unmöglich war. Als Ursachen dafür kommen entweder die ungeeigneten Abdichtung und/oder etwaige Undichtheiten der Messeinrichtung an den Anschlüssen in Frage.

Da in diesem Versuch die Toleranzen der ETK für 30 Minuten eingehalten werden konnte, wurde dafür in diesem Zeitraum eine branddauerabhängige Temperaturverteilung bis in 70 mm Tiefe erstellt (siehe Abbildung 5-24). Darin kann die Wärmeentwicklung und Eindringgeschwindigkeit der Temperatur in die Betonplatte beobachtet werden.

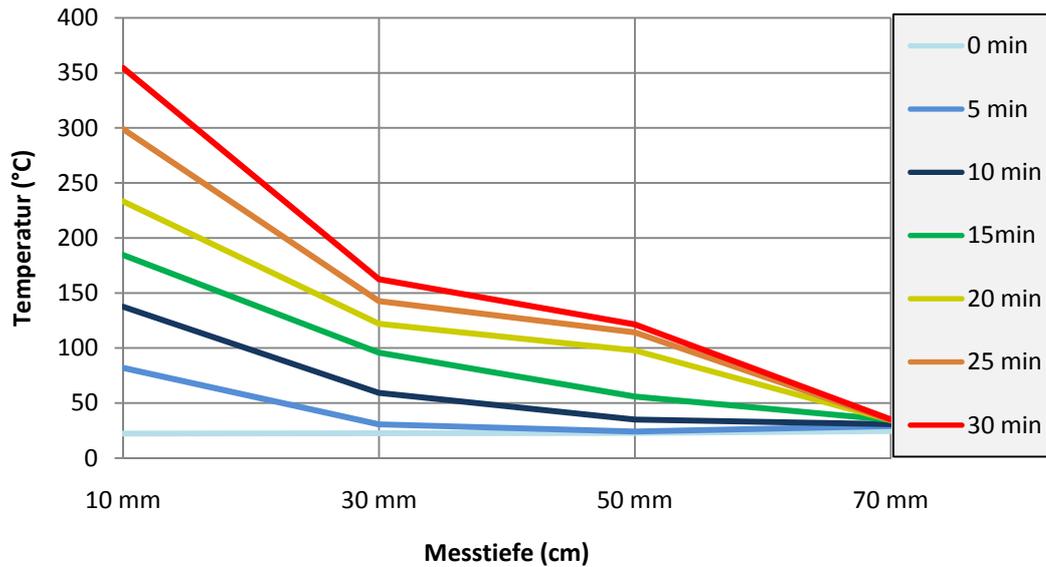


Abbildung 5-24: Branddauerabhängige Temperaturverteilung der Platte M Versuch 3

## 5.5 Versuch 4

### Überlegungen

Für diesen Versuch wurde nach Rücksprache mit der Fa. *IGP-Ingenieurbüro Große-Perdekamp GmbH* als Dichtungsmasse der Silikonkautschuk *SK 300 HT* ausgewählt. *SK 300 HT* ist ein pastöser Einkomponenten-Silikonkautschuk, der bei Raumtemperatur vernetzt. Er eignet sich besonders zum Abdichten und Verkleben bei hohen Temperaturen und weist folgende Eigenschaften auf:

- Beständigkeit gegen Temperaturen bis 300 °C (kurzfristig bis 350 °C)
- gute Haftung auf vielen Untergründen, auch bei hoher Temperatur
- wasser- und feuchtigkeitsbeständig
- resistent gegenüber vielen Chemikalien wie z. B. Öl, Treibstoff, Seewasser, verdünnte Säuren und Salze (*IGP Technisches Produktdatenblatt [14]*).

Die restliche Vorgangsweise entsprach wieder der von M-Versuch 3. Es wurden 3 Löcher bis in ca. 10 cm Tiefe gebohrt, die Kapillarrohre mit Blähtonkügelchen in die Löcher eingebracht, mit Zementschlämme ausgefüllt, gehärtet und mit der Dichtungsmasse verschlossen. Die Situation nach Aufbringen des Silikonkautschuks ist in Abbildung 5-25 dargestellt.



Abbildung 5-25: Platte M-Versuch 4 nach Aufbringen der Dichtungsmasse

Der Versuch fand 7 Tage nach Aufbringen des Silikonkautschuks SK 300 HT statt.

### **Brandversuch**

Platte M-Versuch 4 (keine alte Nummerierung mehr auf der Platte erkenntlich)

Messtiefe: 25mm

Datum: 27.02.2007

Temperaturkurve: ETK

Dauer: 58 min

## Temperaturverlauf

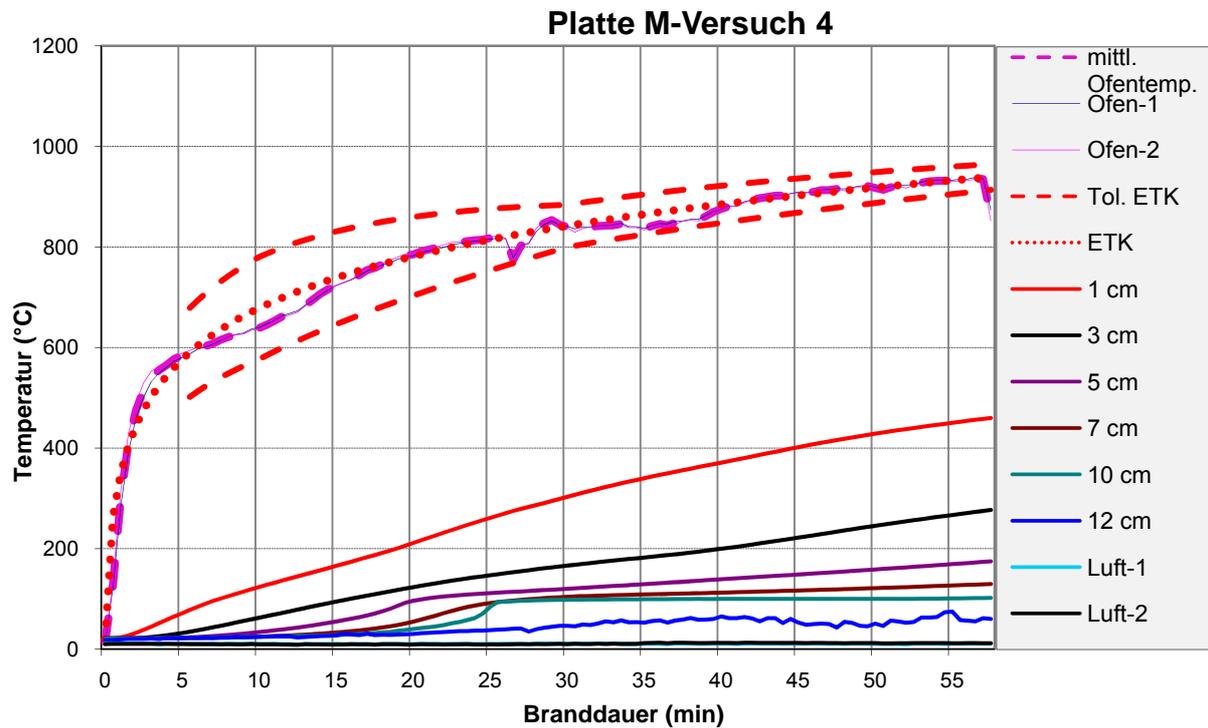


Abbildung 5-26: Temperaturverlauf der Platte M-Versuch 4

Masse vor Brandversuch: 87,65 kg  
Masse nach Brandversuch: 84,90 kg  
Masseänderung in Prozent: - 3,14 %  
Wassergehalt der Platte: 3,14 M-%

## Beobachtungen

9. Minute Beginnender Wasseraustritt an den Seitenflächen
17. Minute Dichtungsmasse des rechten Kapillarrohres (Manometer bis 6 bar) ist eventuell undicht - Wasseraustritt in unmittelbarer Umgebung des Rohres (siehe Abbildung 5-27). Die Dichtungsmasse selbst bleibt jedoch fest.

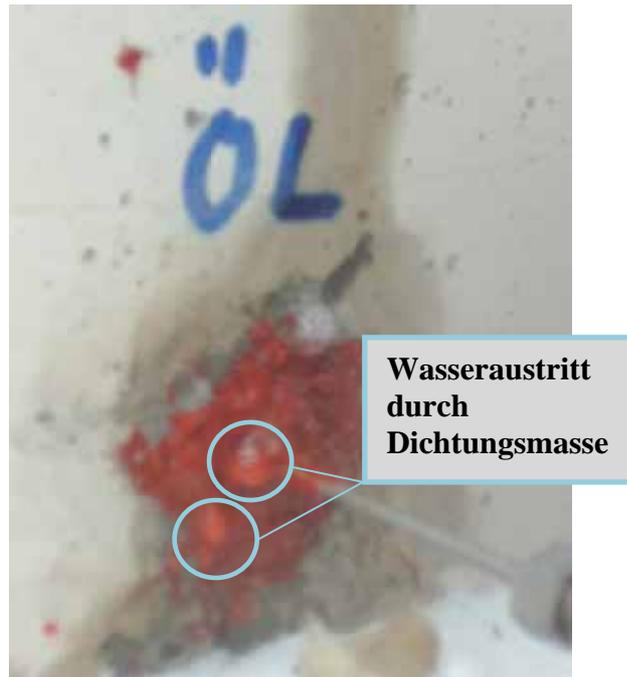


Abbildung 5-27: Wasseraustritt bei Dichtungsmasse Versuch M-VV-04

58. Minute Versuchsende

Es konnte während der ganzen Versuchszeit kein Anstieg des Druckes an den 3 Manometern festgestellt werden.

Der Toleranzbereich der ETK konnte während der Gesamten Versuchsdauer eingehalten werden (siehe Abbildung 5-26).

Es traten keine Abplatzungen während des Versuches auf (siehe Abbildung 5-28).



Abbildung 5-28: Platte M -VV-04 nach dem Brandversuch

## Erkenntnisse und Ergebnisse

Auch mit der neuen Dichtungsmasse konnte kein Ergebnis erzielt werden. Da diese Versuchsanordnung offensichtlich zu unbefriedigenden Ergebnissen führt, wurden an dieser Stelle die Untersuchungen an den großformatigen Platten eingestellt. Um noch zu weiteren Erkenntnissen zu gelangen wurde aber noch ein Versuch mit einer kleinformatischen Platte durchgeführt, der in folgenden Kapitel 5.6 Versuch 5 beschrieben wird.

## 5.6 Versuch 5

### Überlegungen

In diesem Versuch sollte eruiert werden, ob die Messanordnung wie sie bisher verwendet wurde überhaupt Ergebnisse liefern kann und ob der Kapillarrohrdurchmesser einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis hat. Außerdem sollte auch eine grobe Abschätzung des entstehenden Druckes angeführt werden.

Zu diesem Zwecke wurde ein Probekörper mit den Maßen 30 x 15 x 6 cm hergestellt und vier Messingrohre mit den Innendurchmessern von 1 mm, 2 mm, 3 mm und 4 mm in einer Tiefe von 1,5 cm einbetoniert (siehe Abbildung 5-29). Die Röhre reichen in etwa 7 cm in den Beton hinein.



Abbildung 5-29: Probekörper M-Versuch 5

Um einen rasch zunehmenden Druck und ein großes Abplatzverhalten erzielen zu können wurde die Probe 11 Tage vor dem Brandversuch in ein Wasserbad gelegt. Der Austrittsbereich der Rohre wurde wie schon in Versuch 4 mit Silikonkautschuk SK 300 HT verschlossen, um einen Luft-, und Wasseraustritt in diesem Bereich verhindern zu können.

An den Rohren wurden während des Brandversuches Kunststoffschläuche angebracht, die an eine Holzvorrichtung befestigt und mit *Marlotherm*-Öl gefüllt wurden (siehe Abbildung 5-30).

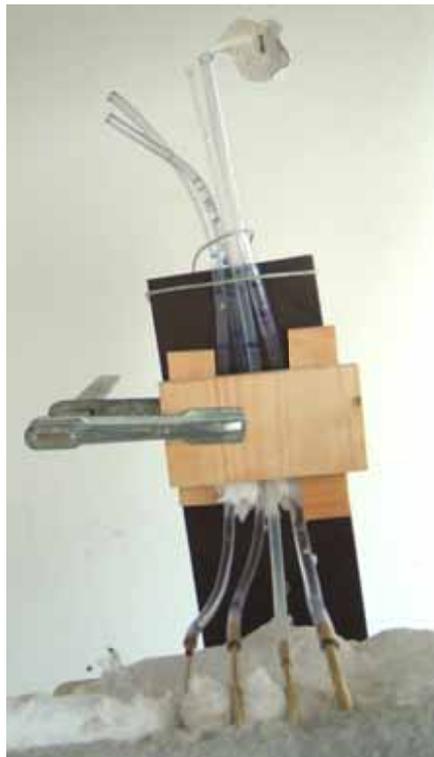


Abbildung 5-30: Befestigung der Kunststoffschläuche

Die Höhe des Ölspiegels wurde an den Schläuchen markiert.

### **Brandofen und Brenner**

Der Brandversuch wurde mit dem neu entwickelten Brandofen des Institutes durchgeführt. Dieser Ofen ist für kleinere Probekörper konzipiert und besteht aus Feuerfest-Steinen und Silikatmatten. Er besitzt nach der Brenneröffnung einen aufgeweiteten Querschnitt und die Lüftungsöffnungen befinden sich seitlich im hinteren Teil des Ofens. Die Beflammung erfolgt mittels eines Propangasbrenners, der Temperaturen über 1000 °C erreichen kann. Die

Temperaturaufzeichnung erfolgte mittels Temperaturmessfühler und *Keithley*-Messdatenaufzeichnungseinheit. Für den Versuch 5 wurden vier Temperaturmessungen in der Brandkammer, eine an der Betonoberfläche und zwei für die Raumtemperatur durchgeführt. Die gesamte Prüfanordnung ist in Abbildung 5-31 abgebildet.



Abbildung 5-31: Prüfanordnung Versuch 5

### **Brandversuch:**

Platte M-Versuch 5

Mischung RK 02

Messtiefe: 15mm

Datum: 04.05.2007

Temperaturkurve: ETK

Dauer: 16 min

Wassergehalt der Platte: Wurde nicht explizit ermittelt, aber ist aus Erfahrungswerten durch die Wasserlagerung bis unmittelbar vor dem Versuch mit deutlich über 6 % anzunehmen.

## Temperaturverlauf

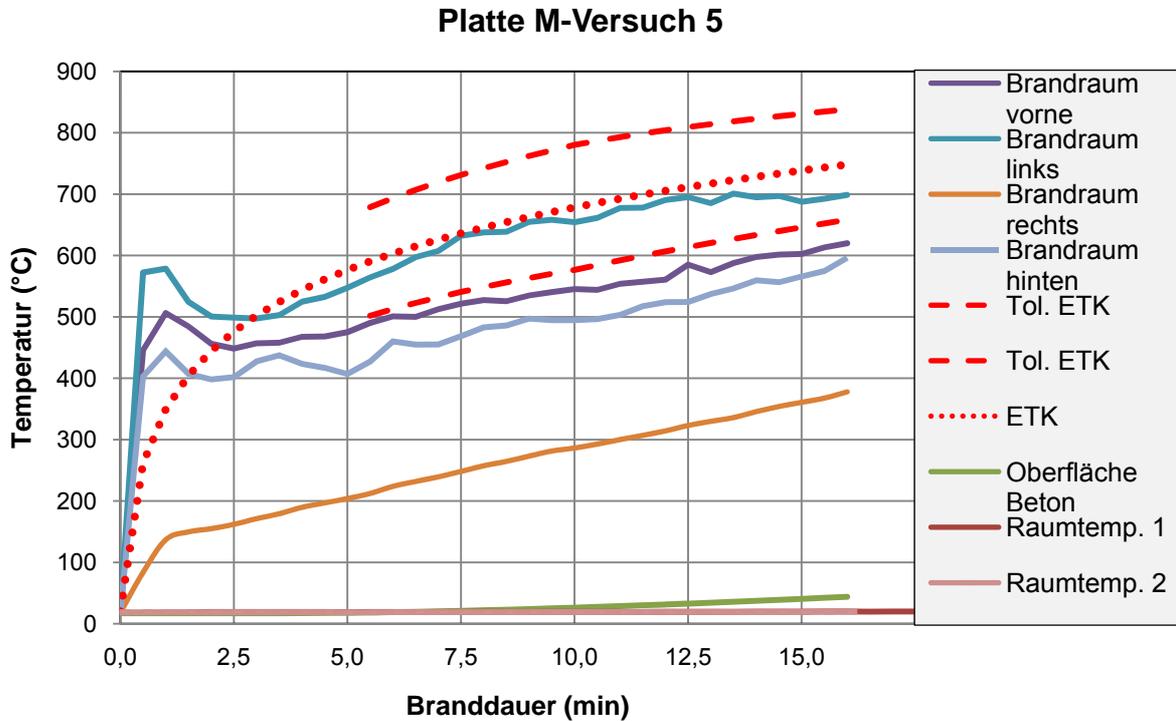


Abbildung 5-32: Temperaturverlauf der Platte M-Versuch 5

Der Temperaturrückgang bei etwa einer Minute ist darauf zurückzuführen, dass manuell Einstellungen am Brenner vorgenommen werden mussten um die Wärmeentwicklung zu reduzieren, da es zum Zeitpunkt des Versuches noch zu wenige Erfahrungswerte mit der genauen Regulierung der Brandkurve gab.

## Beobachtungen

11. Minute Langsame Erhöhung des Ölstandes in allen 4 Rohren

15. Minute Das Öl erreicht den höchsten Stand bevor es zu Abplatzungen kommt

Der niedrigste und höchste Ölstand ist in den Abbildung 5-33 und Abbildung 5-34 gelb markiert.

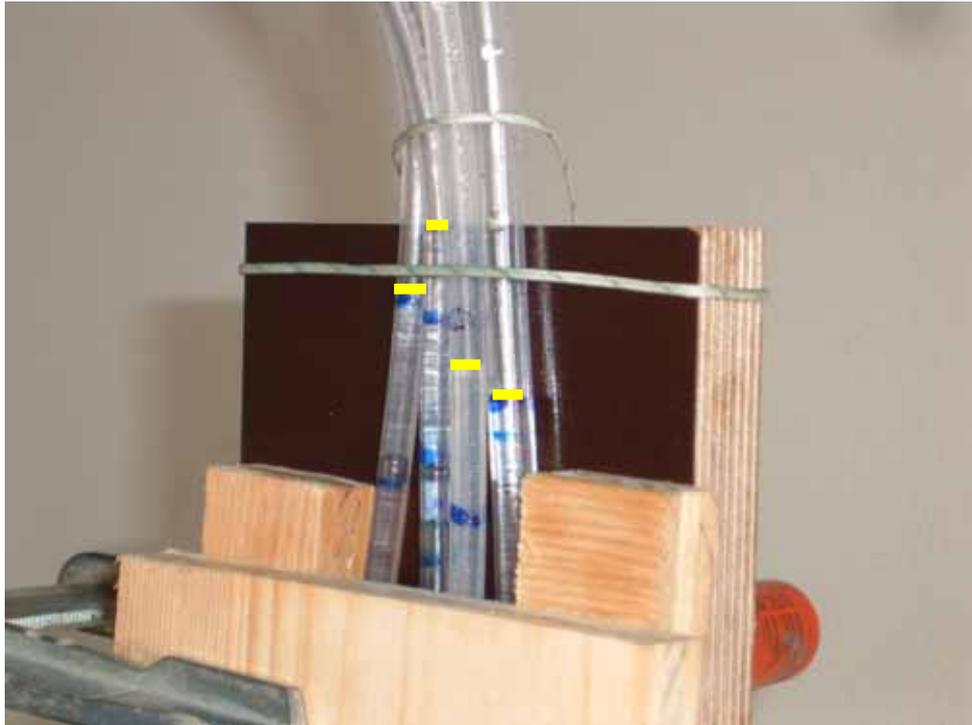


Abbildung 5-33: Ölstand vor Brandversuch

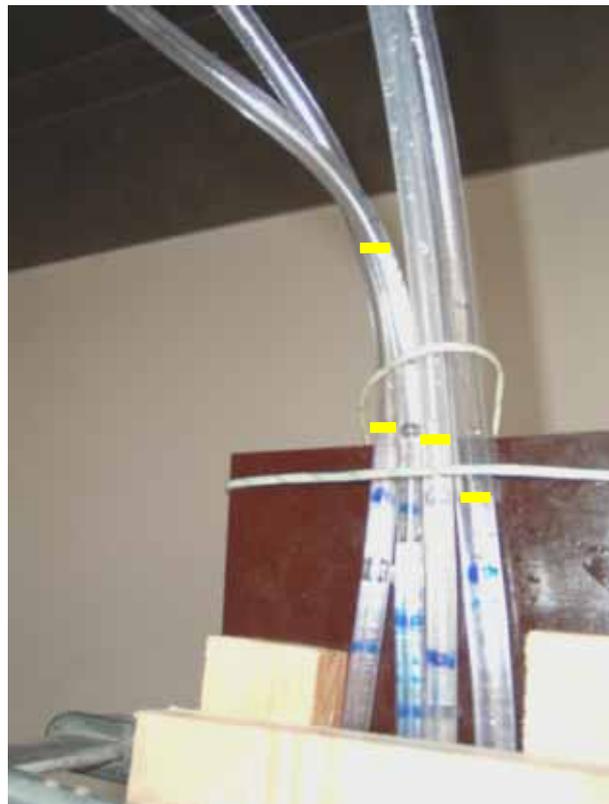


Abbildung 5-34: Ölstand nach Brandversuch

In Zahlen ausgedrückt hat sich der Ölstand folgendermaßen verändert.

Ø 1 mm: Erhöhung des Ölstandes von 15,7 cm auf 17,5 cm über dem Bohrloch

Ø 2 mm: Erhöhung des Ölstandes von 17,2 cm auf 23,7 cm über dem Bohrloch

Ø 3 mm: Erhöhung des Ölstandes von 14,1 cm auf 17,0 cm über dem Bohrloch

Ø 4 mm: Erhöhung des Ölstandes von 13,5 cm auf 15,2 cm über dem Bohrloch

16. Minute Großflächige Abplatzungen (siehe Abbildung 5-35), Versuchsende



Abbildung 5-35: Abplatzungen Versuch 5

### **Erkenntnisse und Ergebnisse:**

Über die Höhendifferenz  $h$  von Messingrohr zu Ölstand (siehe Abbildung 5-36) wurde durch die Formel  $p = \rho \times g \times h$  der entstandene Druck im Beton berechnet. Diese Werte unterliegen allerdings geringen Ungenauigkeiten, da die Anschlüsse von Messingrohr zu Kunststoffschlauch auf diese Art und Weise nicht vollständig dicht ausgeführt werden konnten.

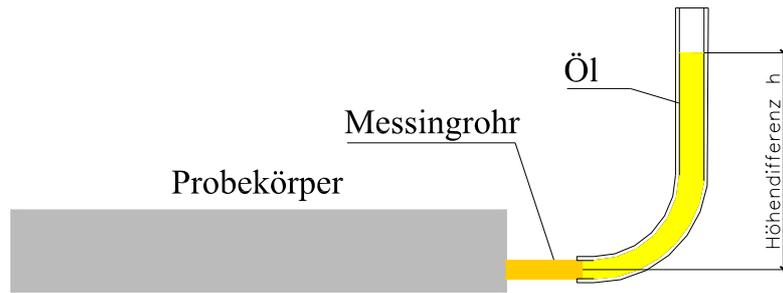


Abbildung 5-36: Skizze Druckmessung

Aus der Dichte des Öls  $\rho$  ( $1044 \text{ kg/m}^3$ ), der Erdbeschleunigung  $g$  ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) und den Höhendifferenzen  $h$  der jeweiligen Messungen errechnen sich die Drücke wie folgt:

$$\text{Ø } 1 \text{ mm: } p = 1044 \times 9,81 \times 0,175 = 1792,3 \text{ Pa} = 0,017923 \text{ bar}$$

$$\text{Ø } 2 \text{ mm: } p = 1044 \times 9,81 \times 0,237 = 2427,3 \text{ Pa} = 0,024273 \text{ bar}$$

$$\text{Ø } 3 \text{ mm: } p = 1044 \times 9,81 \times 0,170 = 1741,1 \text{ Pa} = 0,017411 \text{ bar}$$

$$\text{Ø } 4 \text{ mm: } p = 1044 \times 9,81 \times 0,152 = 1556,7 \text{ Pa} = 0,015567 \text{ bar}$$

Diese Methode ist nicht anwendbar wenn Luftblasen durch das Öl entweichen könnten, da sich dadurch der Druck abbauen würde. Es wurden bei diesem Versuch jedoch keine solchen Beobachtungen gemacht.

Aus diesem letzten Versuch und der oben angeführten Druckberechnung lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Es ist kein wesentlicher Zusammenhang zwischen Rohrdurchmesser und ablesbarem Druck im Bereich der Durchmesser 1 mm bis 4 mm ersichtlich.
- Der entstandene Druck ist weit geringer als der erwartete, obwohl es zu massiven Abplatzungen kam. Deshalb ist anzunehmen, dass die großen Drücke die für die Abplatzungen mitverantwortlich sind nur in einem örtlich sehr begrenzten Bereich entstehen.
- Eine längere Prüfungsdauer ist für weitere Versuche dieser Art jedenfalls anzustreben.
- Bis auf den Anschluss Rohr-Schlauch konnten keine Undichtigkeiten des Messsystems festgestellt werden. Deshalb ist anzunehmen, dass das direkte Einbetonieren der Messrohre bei der Herstellung der Probekörper für die Geschlossenheit des Messsystems von großer Wichtigkeit ist.

## 6 Zusammenfassung

Obwohl das Thema Kapillarporendruck in Beton bei Brandbelastung ein sehr wichtiger Bereich ist, um die thermohydraulischen Prozesse im Beton besser zu verstehen und um genauere Eingangswerte für Rechenmodelle zu erhalten, wurden bis jetzt nur sehr wenige Laborversuche dazu durchgeführt.

Die hier vorliegende Arbeit versucht nun einen Beitrag zur Entwicklung einer Messvorrichtung zur Ermittlung von Kapillarporendrücken in Normalbeton zu geben.

Der theoretische Bereich dieser Arbeit umfasst neben der Aufnahme von Baustoff- und Prüfgrundlagen auch die Festhaltung des derzeitigen Standes der Technik auf diesem Gebiet. Darin sind vor allem die Untersuchungen des *CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)* bemerkenswert, da diese auch im Kapillarbereich ausgeführt wurden und wertvolle Erkenntnisse über den Versuchsaufbau und über maximale Porendrücke liefern. In diesen Laborversuchen wurden in Normalbeton Werte bis zu annähernd 20 bar gemessen, in Hochleistungsbetonen mit Faserzusatz sogar bis zu 40 bar.

Angelehnt an diese Versuche sollte ein möglichst einfaches, exaktes Messgerät für Kapillarporendrücke durch Laborversuche entwickelt und getestet werden.

Zu diesem Zweck wurden Betonplatten und Prüfkörper im Labor des Institutes für Hochbau und Technologie – Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz der Technischen Universität Wien hergestellt, sowie 5 verschiedene Messaufbauten entwickelt und mit der Einheitstemperaturkurve ETK geprüft, wovon keiner jedoch die erwarteten Messergebnisse erreichen konnte. Es konnten jedoch viele Erkenntnisse gewonnen werden, die für zukünftige Forschungen eine Hilfestellung sein können.

Die wesentlichen Empfehlungen für zukünftige Versuche sind in Kapitel 7.2 zusammengefasst.

## 7 Ausblick

### 7.1 Einleitung

In Zukunft wird es von großer Wichtigkeit sein noch exaktere Kenntnisse über den Baustoff Beton im Brandfall zu erlangen, um sein Verhalten durch Rechenmodelle und Computersimulationen immer besser vorhersagen zu können. Dazu sind Laborversuche unerlässlich. Deshalb wird es auch weiterhin Forschungen zu dem Thema Kapillarporendruck und dessen Ermittlung geben müssen.

Die hier vorliegende Arbeit hat kein zufriedenstellendes Ergebnis für ein Kapillarporendruckmessgerät finden können, aber sie kann Ansätze aufzeigen, in welche Richtung zukünftige Versuche gehen könnten und kann Fehler aufzeigen, damit sie nicht nocheinmal gemacht werden. Diese wesentlichen Ansätze und Empfehlungen sind in Kapitel 6.2 angeführt.

### 7.2 Empfehlungen für weiterführende Forschungsarbeiten

- Um die Dichtheit des Messsystems zu gewährleisten sollten die Kapillarrohre unbedingt direkt bei der Herstellung des Prüfkörpers und nicht nachträglich betoniert werden. Während es bei Versuch 3 (nachträglicher Einbau der Rohre) zu periodischen Druckschwankungen kam konnte bei Versuch 5 eine kontinuierliche Druckerhöhung festgestellt werden.
- Der Gebrauch einer Dichtungsmasse am Übergang zwischen Kapillarrohr und Betonoberfläche ist sicher von Vorteil und kann noch zusätzliche Genauigkeit des Messergebnisses liefern, jedoch ist zu beachten dass viele Dichtungsmassen gegen die Kombination von Wärme und Wasserdampf nicht beständig sind. In dieser Arbeit konnte mit dem Silikonkautschuk *SK 300 HT* der Fa. *IGP* ein ausreichend beständiges Produkt gefunden werden.
- Bei Gebrauch von Kapillarrohren mit geringerem Innendurchmesser als 0,5 mm kann sich die Füllung mit Öl je nach Beschaffenheit des Öles sehr schwierig gestalten

(vergl. Kapitel 5.2 Versuche 1). Deshalb sollten Rohre dieser Größe eher nicht befüllt werden.

- Um die Kapillarrohröffnung vor Verschmutzung durch Feinanteile zu bewahren, ist ein Schutz, z.B. wie durch den in Kapitel 5.2 Versuch 3 beschriebenen Schutz durch Blähtonkörnchen oder die Verwendung von gesinterten, porösen Metallplatten wie in Kapitel 3.3 und 3.4. angeführt ist, vorzusehen.
- Durch Perforierung des einbetonierten Kapillarrohrendes könnten mehrere Öffnungen erzeugt werden um den entstehenden Druck in den Messaufbau einzuleiten, und somit die Wahrscheinlichkeit einer Verlegung der Öffnungen verringern.
- An das Ende des Kapillarrohres könnte auch ein kleines Sieb mit geringer Maschenweite angebracht werden, das ebenfalls die Wahrscheinlichkeit der Verlegung des Messsystemes verringern würde.
- Es sollte angedacht werden einen Messaufbau zu entwickeln, den man mit Druckluft oder mit dem Druck einer Ölsäule beaufschlagen kann, um kontrollieren zu können ob das Messsystem dicht ist und dass es funktionsfähig ist.
- Weiters könnte für zukünftige Versuche eine Entlüftung am höchsten Punkt, ähnlich wie bei einem Heizungssystem, vorgesehen werden um Luftblasen in den Rohren die bei der Füllung entstehen könnten zu vermeiden.
- Um das Trägeröl luftblasenfrei in das Rohr einbringen zu können bis das Luftvolumen gänzlich aufgefüllt ist, wäre das Einpressen mittels Druckluft oder einer durch Eigendruck des Öles in einer beispielsweise 1 m hohen Ölsäule in einem Schlauch oder Rohr denkbar.
- Die Verwendung von kleinen Prüfkörpern und eines kleinen Brandofens wie in Versuch 5 bringt eine enorme Erleichterung und Zeitersparnis bei der Durchführung der Versuche mit sich. Dadurch können ohne großen Aufwand viele Probekörper hergestellt, und rasche Fortschritte auf der Suche nach einem den Anforderungen entsprechenden Messvorrichtung gemacht werden.
- Wie z.B. aus den Untersuchungen durch das *CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Fra)* die in Kapitel 3.3 angeführt sind hervorgeht liegen die höchsten bis jetzt gemessenen Drücken in Normalbeton bei etwa 20 bar und bei hochfestem Beton

bei etwa 40 bar. Dementsprechend müssen auch die Manometer für zukünftige Versuche gewählt werden.

- Vor allem bei Prüfkörpern mit geringer Abplatzneigung ist es wichtig, dass die Brandversuche ausreichend lange durchgeführt werden. Während es bei feuchtem Normalbeton in der Regel maximal 15 Minuten dauert bis großflächige Abplatzungen und damit Druckspitzen in geringen Tiefen auftreten, dauert es in Faserbeton oder Hochleistungsbeton oft um ein vielfaches länger (vergl. die Temperatur-Zeitkurven aus Kap. 3).
- Falls nachfolgende Untersuchungen aufbauend auf diese Arbeit weiterhin keine befriedigenden Ergebnisse liefern, wäre es möglich einen Messaufbau ähnlich dem des in Kapitel 3.3 beschriebenen vom *CSTB* zu verwenden, da dieser bereits erprobt ist und bis jetzt die realistischsten Werte hervorgebracht hat.

## 8 Summary

Although pore pressure is a major field to understand the thermohydraulic process in concrete, very few experimental works carried out.

This work was intended to make a contribution to develop a simple and precise measuring instrument for pore pressure in ordinary concrete.

In the theoretical part of this work is amongst other things like basics of concrete technology and concrete testing the present state of the technology summarized. From 1999 to 2002 the *CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)* reached in their experimental work the highest results for pore pressure from 20 bars in normal concrete to 40 bars in high-performance concrete. The measurement setup used in this tests inspired the set-ups developed for this work.

For the laboratory tests were 5 different measurement setups developed and tested (on concrete slabs with the ISO Standard-Curve), but there were no or much less results as expected.

So, the most important results of this work are mainly recommendations for following research works like:

- The tubes for the measurements should be placed at casting before concreting the specimen to guarantee a set-up without leaks.
- The vent of the tube placed in the concrete should be protected against blocking through cement slurry with a sintered metal plate or a little ceramic cylinders or porous aggregate.
- It is practical to use a sealing compound on the concrete surface in the area around the tubes to prevent leaks.
- Tubes with an inner diameter less than 0,5 mm on account of viscosity are difficult to fill with oil and should be avoided to fill.
- A thin thermocouple may be placed inside the capillary tube so a thicker internal diameter is possible and could be filled by the metal thermocouple.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] **Schneider, U.; Horvath, J.:** Brandschutzpraxis im Tunnelbau; 1.Auflage; Bauwerk Verlag GmbH; Berlin; 2006
- [2] **ÖNORM B 4710-1:** Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis, Ausgabe 01.04.2004
- [3] **Schneider, U.:** „Brandschutz“, Wiener Baustofflehre Blätter- TU Wien, Schriftenreihe des Instituts für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, Wien, 2005
- [4] **Schneider, U.:** „Frischbeton“, Wiener Baustofflehre Blätter- TU Wien, Schriftenreihe des Instituts für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, Wien, 2006
- [5] **BASF:** Grundlagen der Betontechnologie, Präsentation; <http://www.basf-cc.at/NR/ronlyres/DC829D6D-34A9-49BA-9B52-64F2C09A4196/0/Betontechnologie.pdf>; download 02.2007
- [6] **Vereinigung der österreichischen Zementindustrie VÖZ:** Unterlage über Betontechnologie; [www.zement.at/file\\_upl/Betontechnologie\\_neueNorm.pdf](http://www.zement.at/file_upl/Betontechnologie_neueNorm.pdf); download 02.2007
- [7] **Verein Deutscher Zementwerke VDZ:** Kompendium Zement und Beton – Kapitel 8; [www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompendiumZementBeton/2-8\\_Brandschutz.pdf](http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompendiumZementBeton/2-8_Brandschutz.pdf), 10/2006
- [8] **Schneider, U.:** „Bindemittel“, Wiener Baustofflehre Blätter- TU Wien, Schriftenreihe des Instituts für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, Wien, 2006
- [9] **BASF:** Betonlexikon; <http://www.basf-cc.at/NR/ronlyres/869C8812-5827-4123-B2D4-CC6C113A4ED0/54927/Betonlexikon.pdf>; download 02.2007
- [10] **Spektrum der Wissenschaft Digital:** Artikel: Brandfester Beton; <http://www.spektrumverlag.de/artikel/828402>; download 02.2007
- [11] **Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik:** Sachstandsbericht, CD-ROM „Brandwirkungen - Straße, Eisenbahn, U-Bahn“, Juli 2005

- [12] **IGP:** Hochtemperaturdichtpaste VP 18499, Technisches Produktdatenblatt, Version 2, 19.09.2005
- [13] **Baierl, C.W.:** Betonplatten für den Gleiskörper von Eisenbahntunnel, Brandversuche. Diplomarbeit an der Technischen Universität, Wien 2006
- [14] **IGP:** Silikonkautschuk SK 300 HT, Technisches Produktdatenblatt, Version 7, 08.06.2006
- [15] **Horvath, J.:** Beiträge zum Brandverhalten von Hochleistungsbetonen. Dissertation an der Technischen Universität, Wien 2003
- [16] **Kusterle, W. et al.:** Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton [Fire Resistance of Fibre-Reinforced, Reinforced and Prestressed Concrete], Schriftenreihe "Straßenforschung", Heft 544, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2004
- [17] **AVIA:** MINERALÖL-ANWENDUNGSTECHNIK, MARLOTHERM SH, Produktdatenblatt, Blatt 13.04, Version 11.04
- [18] **Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik:** Richtlinie Faserbeton, Ausgabe März 2002
- [19] **Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik:** Einführung in die neue Richtlinie Faserbeton, Heft 49, Juni 2002
- [20] **Höfer, H.:** Brandverhalten eines Hochleistungsbetons für den Einsatz im Tunnelbau. Diplomarbeit an der Technischen Universität, Wien 2003
- [21] **Drexler, C.:** Beitrag zum Brandschutz mit Beton für Unterirdische Verkehrsbauten. Diplomarbeit an der Technischen Universität, Wien 2002
- [22] **Schneider, U.; Horvath, J.; Dehn, F.:** Abplatzverhalten von ultrahochfestem Beton unter Brandbeanspruchung, Leipzig Annual Civil Engineering Report, [http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer06/106\\_30.pdf](http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer06/106_30.pdf), download 11.2006
- [23] **Schneider, U.; Horvath, J.:** Behaviour of Ordinary Concrete at High Temperatures. Institutsheft 9. Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, TU Wien, 2003
- [24] **Ulm, F.-J. et al.:** The "Chunnel" Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete, Journal of Engineering Mechanics, Volume 125, Issue 3, Herausgeber: American Society of Civil Engineers (ASCE), März 1999

- [25] **Deutscher Ausschuß für Stahlbeton:** Abplatzversuche an Prüfkörpern aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton bei verschiedenen Temperaturbeanspruchungen, Heft 241, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1974
- [26] **KRÜSS:** Homepage, Theorie – Methoden – Ober- und Grenzflächen, <http://www.kruss.de/>, März 2007
- [27] **DataPhysics:** Homepage, [http://www.dataphysics.de/deutsch/service\\_gloss.htm](http://www.dataphysics.de/deutsch/service_gloss.htm), April 2007
- [28] **KRÜSS:** Homepage, Theorie – Methoden – Kontaktwinkel, <http://www.kruss.de/>, März 2007
- [29] **Swagelok:** Katalog für Prüflöhrenfähige Rohrverschraubungen und Adapter, <http://www.swagelok.de/downloads/webcatalogs/DE/MS-01-140.pdf>, Februar 2007
- [30] **Phan, L.T.:** High-Strength Concrete at High Temperature: An Overview, Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 6th International Symposium. Proceedings. Volume 1, Leipzig, Deutschland, Herausgeber: König, G.; Dehn, F.; Faust, T., Juni 2002
- [31] **NIST:** International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete. Proceedings. Appendix B: Workshop Papers. B8., Gaithersburg, MD, Herausgeber: Phan, L. T.; Carino, N. J.; Duthinh, D.; Garboczi, E., Februar 1997.
- [32] **Lindlbauer, W. et al.:** Die Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton, Aufgabenstellung und Versuchsdurchführung, Bericht der Straßenforschung 3.269 und HL-AG, Herausgeber: Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH, Februar 2003, [http://www.ibs-austria.at/fileadmin/downloads/IBS\\_BrandbestaendigkeitFaserStahlSpannbeton.pdf](http://www.ibs-austria.at/fileadmin/downloads/IBS_BrandbestaendigkeitFaserStahlSpannbeton.pdf), download März 2007
- [33] **Kalifa, P. et al.:** Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, Volume 30, Number 12, Herausgeber: Elsevier, December 2000
- [34] **Bazant, Z.P. et al.:** Pore Pressure and Drying of Concrete at high Temperature, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol 104, No. 5, Oktober 1978
- [35] **Kalifa, P. et al.:** Comportement à haute température des Bétons à Hautes Performances: de l'éclatement à la microstructure, Études et Recherches, Cahier n° 3435, Dezember 2002

- [36] **Kordina, K., Meyer-Ottens, C.:** Beton Brandschutz-Handbuch. 2. Auflage, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 1999
- [37] **Horvath, J. et al.:** Behaviour of Ordinary Concrete at High Temperatures; Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz; Technische Universität Wien ; Heft 9; Wien; 2004
- [38] **IFB (Institut für Baustoffe der ETH Zürich):** Ergänzungen Skript Werkstoffe im Bauwesen, download <http://www.ifb.ethz.ch/education/WerkstoffeI/Erganzung.pdf>, März 2007
- [39] **Valentin, G.; Kidéry, G.F.:** Stahlbetonbau, 10. Auflage; Verlag Manz, Wien 2001
- [40] **Gerdas, A.:** Dauerhaftigkeit des Werkstoff Betons – ausgewählte Werkstoffeigenschaften, Nachrichten aus dem Institut für Technische Chemie, 1. Jahrgang, Heft 2, Karlsruhe, 2002
- [41] **Calciumbo:** Homepage, Absatz: Große Poren - geringes Schwinden <http://www.calciumbo.de/datenfakten/schnellundstabil/Schnell%20und%20stabil.htm>, download April 2007
- [42] **Häger, A.:** Bautechnik und Brandschutz; Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 1996
- [43] **Schneider, U.; Lebeda, C.:** Baulicher Brandschutz; Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 2000
- [44] **Schneider, U.:** „Festbeton“, Wiener Baustofflehre Blätter- TU Wien, Schriftenreihe des Instituts für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, Wien, 2006
- [45] **ÖNORM EN 1363-1:** Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Österreichisches Normungsinstitut, Wien; Ausgabe 2000-01-01
- [46] **Thienel, K.-Ch.:** Skriptum Werkstoffe des Bauwesens, Dauerhaftigkeit von Beton, Frühjahrstrimester 2006, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 2006
- [47] **BiM (Baustoffkreislauf im Massivbau):** Lexikon auf der Homepage, <http://www.b-i-m.de/lexikon/INHALT/fasern.htm>, download März 2007

- [48] **J. Horvath et al.:** Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz; Technische Universität Wien; Heft 11; Wien; 2004
- [49] **der-brunnen.de:** Homepage, <http://www.der-brunnen.de/wasser/druckmessung/druckmessung.htm>, download Mai 2007
- [50] **Wikipedia:** Stichwort Drucksensor, [http://de.wikipedia.org/wiki/Piezoresistiver\\_Drucksensor](http://de.wikipedia.org/wiki/Piezoresistiver_Drucksensor), download Mai 2007

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Porengrößenverteilung wichtiger anorganischer Baustoffe ( <i>Calciumbo</i> [41]).	7
Abbildung 2-2: Transportphänomene in Beton ( <i>K. Thienel</i> S.8 [46]) .....	7
Abbildung 2-3: Hydratation bei verschiedenen W/B-Werten ( <i>BASF</i> S.5 [5]).....	8
Abbildung 2-4: Walzkurve ( <i>Vereinigung der österreichischen Zementindustrie</i> S.3 [6]).....	9
Abbildung 2-5: Zusammensetzung der Struktur des Zementsteins in Abhängigkeit vom W/B- Wert ( <i>U. Schneider</i> S. 48 [8]) .....	10
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Hydratphasen und der Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zementes ( <i>U.Schneider</i> S.43 [8]) .....	14
Abbildung 2-7: Schema der Verminderung des Hohlraums bei einem Einkorngemisch durch Zugabe von kleinen Körnern ( <i>U. Schneider</i> S.32 [4]) .....	18
Abbildung 2-8: Grenzsieblinie GK 16 mm (ÖNORM B 4710-1 S.35 [10]).....	19
Abbildung 2-9: Wirkungsweise von Verflüssiger und Fließmittel auf Wasseranspruch und Konsistenz ( <i>IFB</i> S.1 [38]) .....	21
Abbildung 2-10: fibrillierte Fasern ( <i>Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik</i> S. 11 [19]).....	25
Abbildung 2-11: monofilamentale Fasern ( <i>Österreichische Vereinigung für Beton- und</i> <i>Bautechnik</i> S.11 [19]).....	25
Abbildung 2-12: Thermogravimetrische Untersuchungen von Polypropylenfasern, Aufheizgeschw. 5 K/min ( <i>J. Horvat et al.</i> S.132 [37]) .....	26
Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Permeabilitätstheorie ( <i>J. Horvath</i> S.43 [15])	27
Abbildung 2-14: Spannungs-Dehnungskurven von Normalbeton bei hohen Temperaturen ( <i>K.</i> <i>Kordina; R. Meyer-Ottens</i> S.52 [36]).....	28
Abbildung 2-15: Zerstörung von Beton unter Brandbeanspruchung mit ETK ( <i>A. Häger</i> S.109 [42]).....	30
Abbildung 2-16: Bezogene Hochtemperaturfestigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei verschiedenen Vorlasten ( <i>K. Kordina; R. Meyer-Ottens</i> S.54 [36]).....	31
Abbildung 2-17: Verformung einachsig belasteter Betonproben aus Normalbeton bei instationärer Wärmebeanspruchung ( <i>U. Schneider, C. Lebeda</i> S.119 [43]).	32

Abbildung 2-18: Bezogener Hochtemperatur-E-Modul von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei verschiedenen Vorlasten während der Aufheizung der Betone ( <i>U.Schneider; J. Horvath</i> S.300 [1]) .....	33
Abbildung 2-19: Temperaturverteilung in einseitig nach ETK belasteter Platten bzw. Scheiben aus Normalbeton ( <i>U. Schneider</i> S.173 [3]) .....	34
Abbildung 2-20: Spannungsverteilung infolge unterschiedlicher Dehnungen ( <i>F. Ulm, et al.</i> S.273 [24]).....	37
Abbildung 2-21: Thermische Dehnungen von Zuschlägen und Zementstein in Abhängigkeit der Temperatur ( <i>U. Schneider, J. Horvath</i> S. 30 [23]).....	38
Abbildung 2-22: Schematische Darstellung der Entstehung von Abplatzungen ( <i>U. Schneider; J. Horvath, F. Dehn</i> S.284 [22]) .....	40
Abbildung 2-23: Temperatur-, Dampfdruck- und Feuchtigkeitsverteilung von Normalbeton und hochfestem Beton unter einseitiger Brandbeanspruchung ( <i>U. Schneider; J. Horvath, F. Dehn</i> S. 285 [22]).....	41
Abbildung 2-24; Abfolge bei Betonabplatzungen ( <i>U. Schneider; J. Horvath, F. Dehn</i> S. 285 [22]).....	41
Abbildung 2-25: Dampfdruck-Kurve ( <i>J. Horvath</i> S.37 [15]). .....	42
Abbildung 2-26: Schematische Darstellung des Temperatur- und Wasserdampfdruckverlaufes in einem Betonkörper unter Brandbeanspruchung ( <i>C. Drexler</i> S.83[21]) .....	42
Abbildung 2-27: Europäische Temperatur-Zeitkurven ( <i>Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik</i> S.4 [11]) .....	43
Abbildung 2-28: Grafische Darstellung ETK mit Toleranzbereichen .....	46
Abbildung 3-1: Schematische Ansicht des Probekörpers und Messanordnung ( <i>L. T. Phan, S. 4</i> [30]).....	48
Abbildung 3-2: Porendruckentwicklung in verschiedenen Tiefen ( <i>L. T. Phan, S. 7</i> [30]) .....	48
Abbildung 3-3: Porendruck in 25 mm Tiefe in verschiedenen Probekörpern ( <i>L. T. Phan</i> S. 7 [30]).....	49
Abbildung 3-4: Messeinrichtung Zementmörtel ( <i>NIST</i> S.137 [31]) .....	50
Abbildung 3-5: Temperaturverlauf während Porendruckversuch ( <i>NIST</i> S.138 [31]).....	50
Abbildung 3-6: Auftretende Porendrücke im Zementmörtel ( <i>NIST</i> S.139 [31]) .....	51
Abbildung 3-7: Messaufbau Versuche <i>CSTB</i> ( <i>P.Kalifa et al.</i> S.8 [35]).....	52
Abbildung 3-8: Druckmesssonde <i>CSTB</i> ( <i>P.Kalifa et al.</i> S.9 [35]) .....	53

---

Abbildung 3-9: Temperaturverlauf, Porendruckverlauf und Masseverlust von Normalbeton bei 600 °C ( <i>P.Kalifa et al. S. 1918 [33]</i> ).....	54
Abbildung 3-10: Drucksonde ( <i>W. Lindlbauer et al. S.6 [32]</i> ) .....	55
Abbildung 3-11: Versuchskörper mit Druckmessenden ( <i>W. Lindlbauer et al. S.3 [32]</i> ) .....	56
Abbildung 3-12: Temperaturmessungen in den einzelnen Tiefenstufen der Druckaufnehmer in Faserbeton ( <i>W. Kusterle et al. S.122 [16]</i> ) .....	56
Abbildung 3-13: Dampfdruckmessungen in den einzelnen Tiefenstufen ( <i>W. Kusterle et al. S.122 [16]</i> ).....	57
Abbildung 4-1: Kornklasse 0/1 .....	62
Abbildung 4-2: Kornklasse 1/4 .....	62
Abbildung 4-3: Kornklasse 4/8 .....	63
Abbildung 4-4: Kornklasse 8/16 .....	63
Abbildung 4-5: Siebturm.....	63
Abbildung 4-6: Sieblinie RK 01-1 (rote Farbe) .....	64
Abbildung 4-7: Sieblinie RK 01 (rote Farbe).....	66
Abbildung 4-8: Sieblinie RK 02.....	67
Abbildung 4-9: Betonbestandteile Mischung RK 02 .....	68
Abbildung 4-10: <i>Eirich</i> -Intensivmischer mit Schaltkasten .....	69
Abbildung 4-11: Touchscreen <i>Eirich</i> -Mischer.....	70
Abbildung 4-12: Stiftenwirbler .....	70
Abbildung 4-13: Holzschalungen.....	71
Abbildung 4-14: Thermoelemente .....	72
Abbildung 4-15: Schalung Probewürfel.....	73
Abbildung 4-16: Wasserlagerung.....	74
Abbildung 4-17: Ausbreittisch mit Stößel und Prüfform.....	75
Abbildung 4-18: Luftgehaltprüfer .....	75
Abbildung 4-19: Prüfmaschine Druckfestigkeit .....	76
Abbildung 4-20: Bruch eines Betonwürfels beim Druckversuch ( <i>U. Schneider S.27 [44]</i> ).....	77
Abbildung 4-21: Trocknungsöfen .....	77
Abbildung 4-22: Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Benetzung ( <i>KRÜSS [28]</i> )....	83
Abbildung 4-23: Kontaktwinkelbildung auf einer Festkörperoberfläche nach <i>Young</i> ( <i>KRÜSS [26]</i> ).....	85

---

Abbildung 4-24: Bestimmung des dispersen Oberflächenspannungsanteils nach Fowkes .....	85
Abbildung 4-25: Versuchsbrandofen ( <i>C.W. Baierl</i> S.47 [13]).....	89
Abbildung 4-26: Brenner Fa. <i>Olymp</i> .....	89
Abbildung 4-27: Schematischer Aufbau Rohrfedermanometer ( <i>der-brunnen.de</i> [49]).....	90
Abbildung 4-28: Messeinrichtung Temperatur .....	91
Abbildung 4-29: Temperaturaufzeichnung .....	92
Abbildung 5-1: Temperaturverlauf Platte VV-12-2 RK 01* .....	93
Abbildung 5-2: Platte KM VV 12-2 RK 01 nach dem Brandversuch .....	94
Abbildung 5-3: Kapillarrohre in Frischbeton.....	95
Abbildung 5-4: Füllen der Kapillarrohre .....	95
Abbildung 5-5: Abdichten der Betonoberfläche .....	97
Abbildung 5-6: Manometer bis 100 bar .....	97
Abbildung 5-7: Klemmringsystem <i>Swagelok</i> ( <i>Swagelok</i> S. 2 [29]).....	98
Abbildung 5-8: Messeinrichtung 1.....	99
Abbildung 5-9: Messeinrichtung 2.....	99
Abbildung 5-10: Fertig montierte Messvorrichtung 2 .....	100
Abbildung 5-11: Temperaturverlauf M-HV10-1 RK 02.....	101
Abbildung 5-12: Blasenbildung bei der Dichtmasse an Platte M-HV10-1 RK 02 .....	102
Abbildung 5-13: Platte M-HV10-1 RK 02 nach Brandversuch.....	102
Abbildung 5-14: Temperaturverlauf Platte MHV10-2 RK 02 .....	103
Abbildung 5-15: Platte M-HV10-2 RK 02 nach Brandversuch.....	104
Abbildung 5-16: Schutz der Kapillarrohröffnung vor Verlegung.....	106
Abbildung 5-17: Temperaturverlauf Platte M-Versuch 2 .....	107
Abbildung 5-18: Manometer, Messbereich 0-10 bar .....	109
Abbildung 5-19; Manometer, Messbereich 0-6 bar .....	109
Abbildung 5-20: Anordnung Manometer Versuch 4 .....	110
Abbildung 5-21: Temperaturverlauf der Platte M-Versuch 3 .....	111
Abbildung 5-22: Blasenbildung der Dichtpaste bei Platte M-VV-04 .....	112
Abbildung 5-23: Platte M-VV-03 nach dem Brandversuch.....	113
Abbildung 5-24: Branddauerabhängige Temperaturverteilung der Platte M Versuch 3 .....	114
Abbildung 5-25: Platte M-Versuch 4 nach Aufbringen der Dichtungsmasse.....	115
Abbildung 5-26: Temperaturverlauf der Platte M-Versuch 4.....	116

Abbildung 5-27: Wasseraustritt bei Dichtungsmasse Versuch M-VV-04 .....	117
Abbildung 5-28: Platte M -VV-04 nach dem Brandversuch.....	117
Abbildung 5-29: Probekörper M-Versuch 5 .....	118
Abbildung 5-30: Befestigung der Kunststoffschläuche .....	119
Abbildung 5-31: Prüfanordnung Versuch 5 .....	120
Abbildung 5-32: Temperaturverlauf der Platte M-Versuch 5.....	121
Abbildung 5-33: Ölstand vor Brandversuch .....	122
Abbildung 5-34: Ölstand nach Brandversuch .....	122
Abbildung 5-35: Abplatzungen Versuch 5.....	123
Abbildung 5-36: Skizze Druckmessung.....	124

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Betoneinteilung nach Rohdichte ( <i>U. Schneider</i> S. 3 [4]) .....	3
Tabelle 2-2: Druckfestigkeitsklassen für Normalbeton nach ÖNORM B 4710-1 .....	4
Tabelle 2-3: Klassifizierung der Poren in einem zementgebundenen Werkstoff nach <i>Setzer</i> und <i>IUPAC</i> ( <i>A. Gerdes</i> S.53 [40]).....	6
Tabelle 2-4: Abfall der Betondruckfestigkeit mit steigendem W/B-Wert ( <i>G. Valentin, G.F.</i> <i>Kidéry</i> S.40 [39]).....	10
Tabelle 2-5: PZ-Klinkerphasen, Eigenschaften und Massenanteile ( <i>U. Schneider</i> S.39 [10])	12
Tabelle 2-6: Bezeichnung der Zusatzstoffmenge ( <i>U. Schneider</i> S. 35 [4]) .....	15
Tabelle 2-7: Übersicht über die Arten von Gesteinskörnungen ( <i>U. Schneider</i> S.7 [4]) .....	17
Tabelle 2-8: Arten und Wirkungen von Zusatzmitteln ( <i>U. Schneider</i> S. 54 [4]).....	20
Tabelle 2-9: Einfluss von Fasern auf die Betoneigenschaften ( <i>Österreichische Vereinigung für</i> <i>Beton und Bautechnik</i> S. 44 f. [18] mit Ergänzungen von Prof. <i>U. Schneider</i> ).....	22
Tabelle 2-10: Arten und Eigenschaften von Polypropylenfasern ( <i>U. Schneider</i> S.15 [4]).....	24
Tabelle 2-11: Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischem und kalzitischem Beton ( <i>J. Horvath</i> S.35 [15]).....	29
Tabelle 2-12: Zuschlagstoffe, die bei Temperaturbelastung eventuell abplatzen können ( <i>J.</i> <i>Horvath</i> S.35 [15]) .....	36
Tabelle 2-13: Gradienten von Brandkurven ( <i>J. Horvath</i> S.12 [15]) .....	44
Tabelle 2-14: Temperaturwerte der ETK.....	45
Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Ergebnisse des <i>NIST</i> , <i>CSTB</i> und <i>BMVIT</i> .....	58
Tabelle 3-2: Weitere Untersuchungen zu Porendruck .....	59
Tabelle 4-1: Ursprüngliche Versuchsplanung.....	60
Tabelle 4-2: Ausgeführte Brandversuche.....	61
Tabelle 4-3: Betonrezeptur RK 01* .....	65
Tabelle 4-4: Betonrezeptur RK 01 .....	66
Tabelle 4-5: Betonrezeptur RK 02 .....	67
Tabelle 4-6: Ergebnisse für Luftporenanteil und Ausbreitmaß - Vorversuche.....	78
Tabelle 4-7: Luftporenanteil und Ausbreitmaß - Versuche .....	78
Tabelle 4-8: Wassergehalt Probewürfel Vorversuche.....	79
Tabelle 4-9: Wassergehalt Probewürfel Versuche.....	79

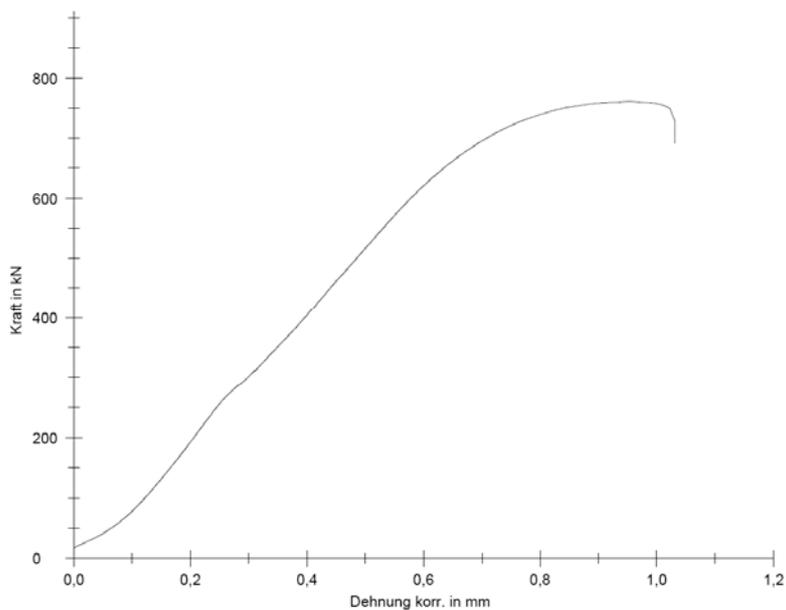
Tabelle 4-10: Druckfestigkeit Vorversuche .....	80
Tabelle 4-11: Druckfestigkeit Versuche RK02 .....	80
Tabelle 4-12: Druckfestigkeit Versuche RK01 .....	81
Tabelle 4-13: Technische Daten <i>MARLOTHERM SH</i> (AVIA Produktdatenblatt [17]).....	82
Tabelle 4-14: Messergebnisse Oberflächenspannung <i>Marlotherm</i> .....	83
Tabelle 4-15: Messergebnisse Kontaktwinkelmessung <i>Marlotherm</i> .....	84
Tabelle 4-16: Versuchsprotokoll disperse und polare Oberflächenspannung.....	86
Tabelle 4-17: Kapillarwirkung <i>Marlotherm</i> .....	87
Tabelle 4-18: Volumenstrom durch Kapillarrohre bei einem Druck von 1 bar .....	88
Tabelle 5-1: Messtiefen Kapillarrohre 0,23 mm .....	96

## 12 Anhang – Druckversuche

### 12.1 Vorversuche RK 01\*

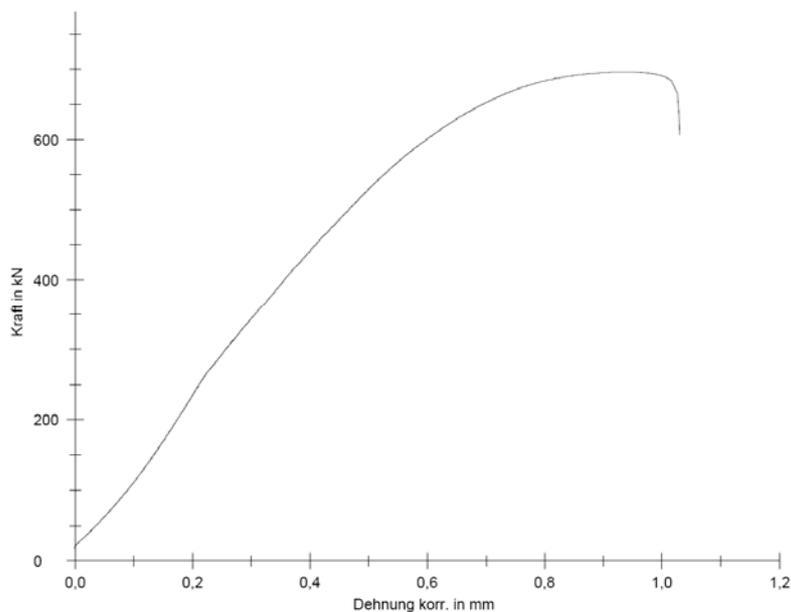
Probewürfel KM-VVPW2 RK01\* (Probennr.1 in Ergebnisprotokoll)

betoniert:21.11.06    geprüft: 30.11.06



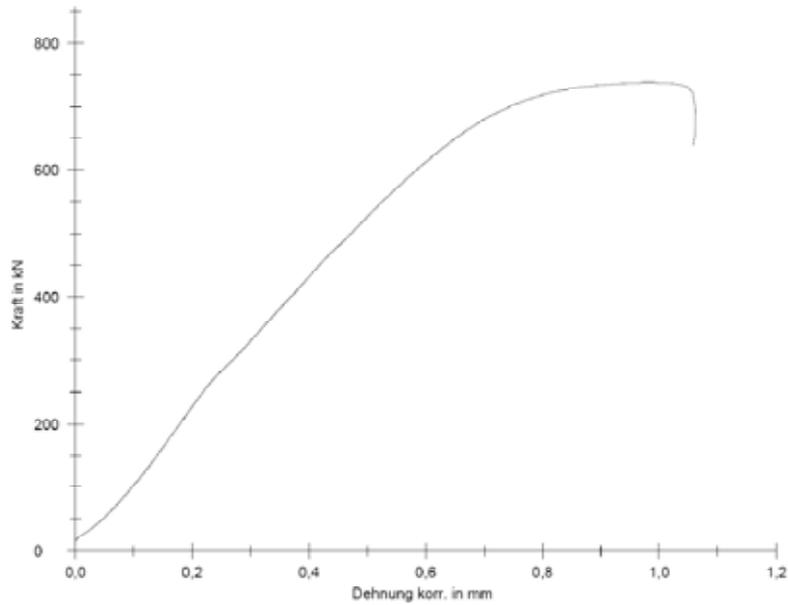
Probewürfel KM-VVPW4 RK01\* (Probennr. 2 in Ergebnisprotokoll)

betoniert: 21.11.06    geprüft: 30.11.06



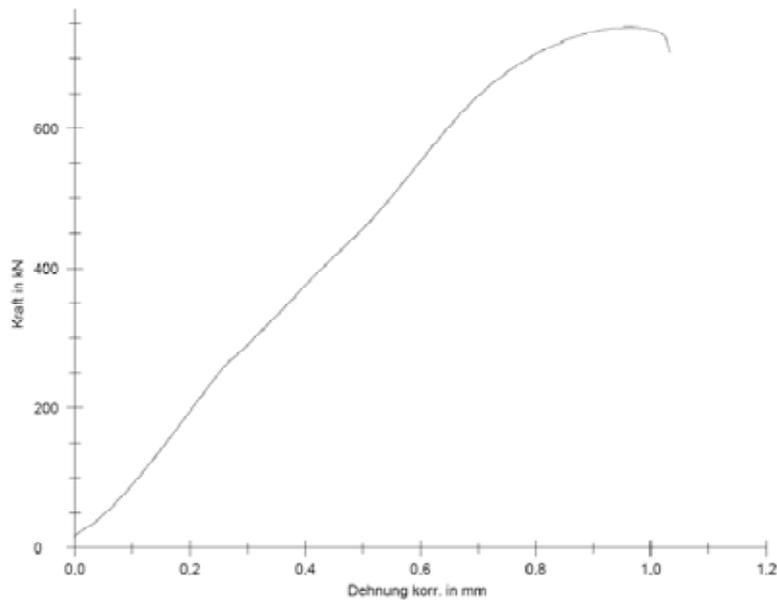
Probewürfel KM-VVPW6 RK01\* (Probennr. 3 in Ergebnisprotokoll)

betoniert: 21.11.06    geprüft: 30.11.06



Probewürfel KM-VVPW8 RK01\* (Probennr. 4 in Ergebnisprotokoll)

betoniert: 21.11.06    geprüft: 30.11.06



## Ergebnisprotokoll

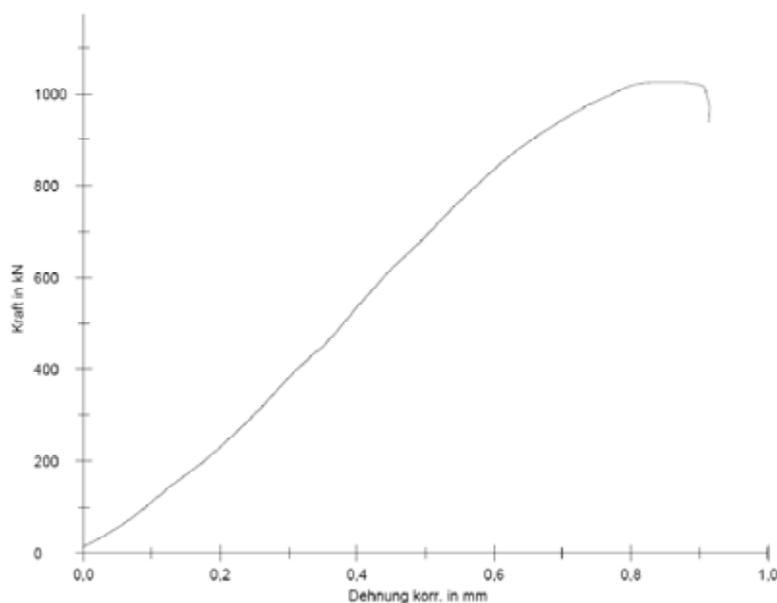
Nr	Probennummer	A mm <sup>2</sup>	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	F <sub>max</sub> kN	σ <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>m</sub> mm	W <sub>m</sub> Nm	W <sub>b</sub> Nm
1	1	22801	150,2	150,5	760,22	33,34	0,96	438,19	493,04
2	2	22875	152,3	150,2	696,02	30,43	0,93	418,76	485,86
3	3	22515	150,1	150	737,63	32,76	0,98	462,77	517,41
4	4	22515	150,1	150	744,68	33,07	0,96	412,54	467,50

:

## 12.2 Probewürfel RK 02

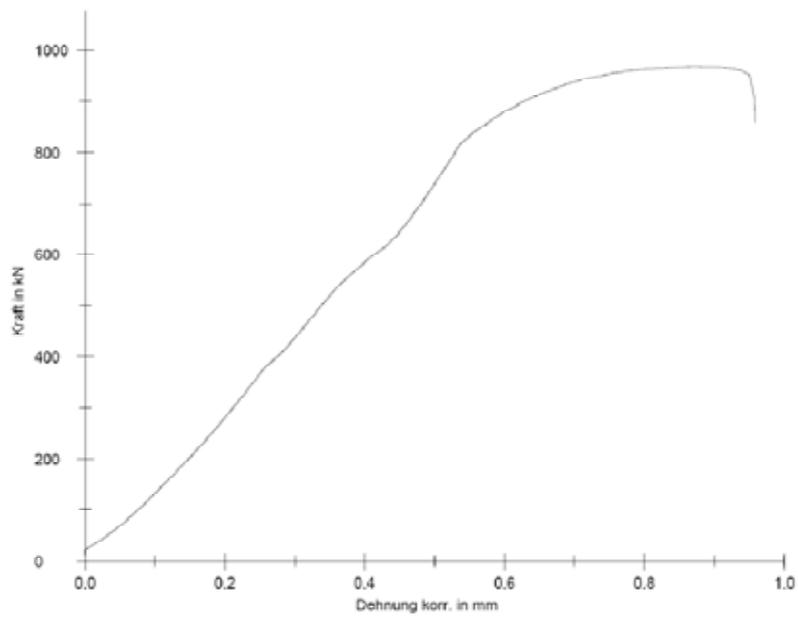
Probewürfel M-HV PW1 (Probennr.1 in Ergebnisprotokoll)

Mischung RK 02 betoniert: 13.12.06 geprüft: 10.01.07



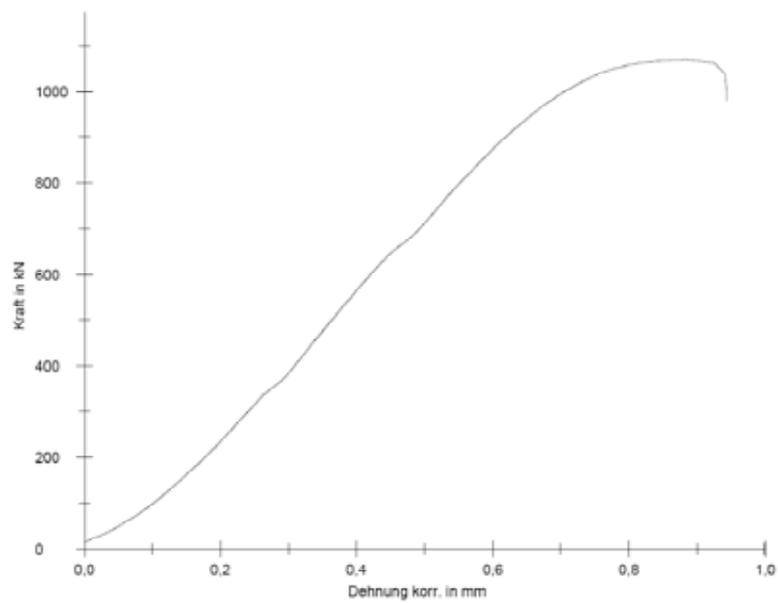
Probewürfel M-HV PW3 (Probennr.2 in Ergebnisprotokoll)

Mischung RK 02 betoniert: 14.12.06 geprüft: 12.01.07



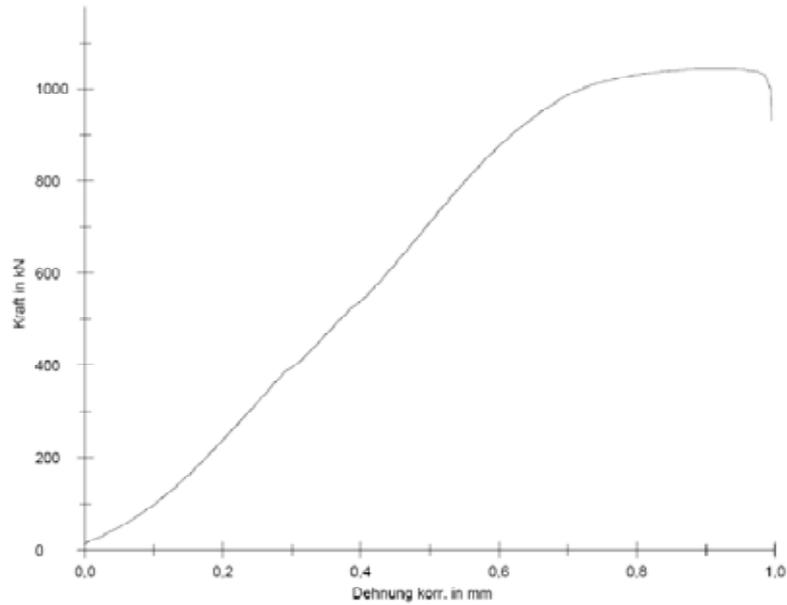
Probewürfel M-HV PW5 (Probennr.3 in Ergebnisprotokoll)

Mischung RK 02     betoniert: 13.12.06     geprüft: 12.01.07



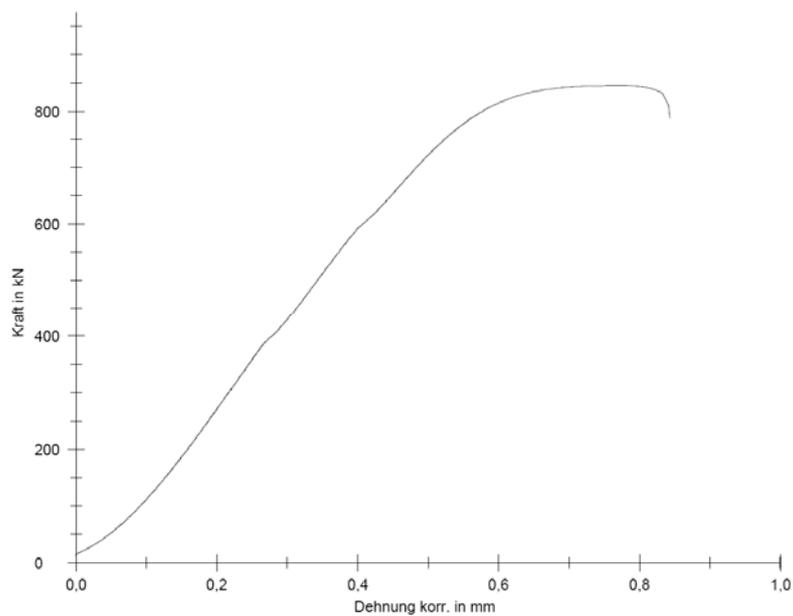
Probewürfel M-HV PW7 (Probennr.4 in Ergebnisprotokoll)

Mischung RK 02    betoniert: 13.12.06    geprüft: 12.01.07



Probewürfel M-HV PW9 (Probennr.5 in Ergebnisprotokoll)

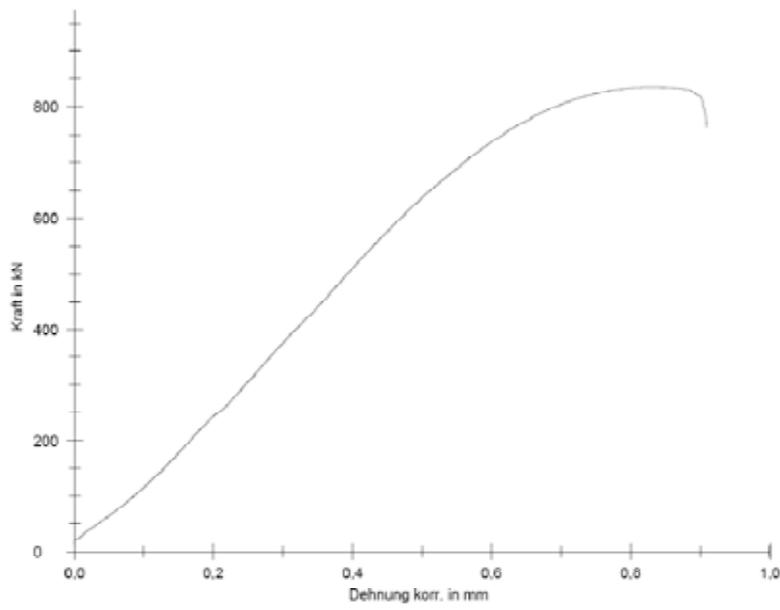
Mischung RK 02    betoniert: 13.12.06    geprüft: 12.01.07



## 12.3 Probewürfel RK 01

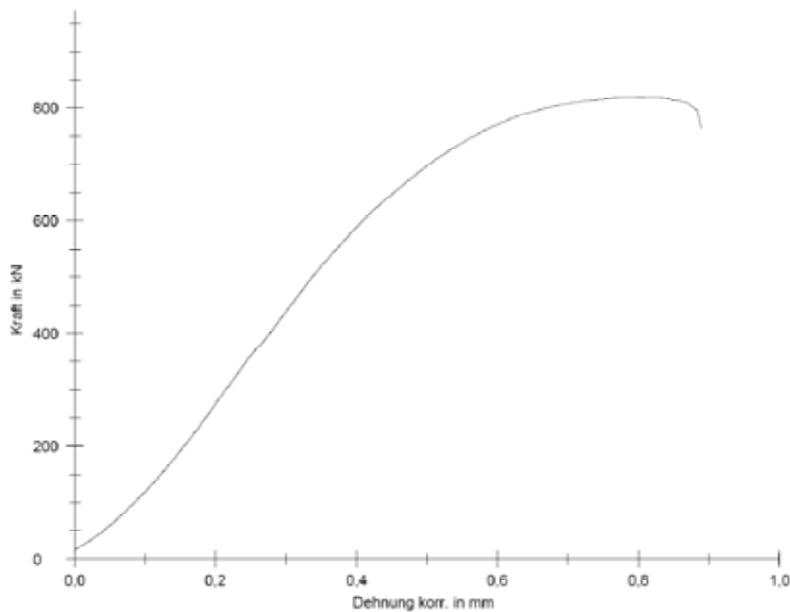
Probewürfel M-HV PW11 (Probennr.6 in Ergebnisprotokoll)

Mischung RK 01      betoniert: 13.12.06      geprüft: 12.01.07



Probewürfel M-HV PW13 (Probennr.7 in Ergebnisprotokoll)

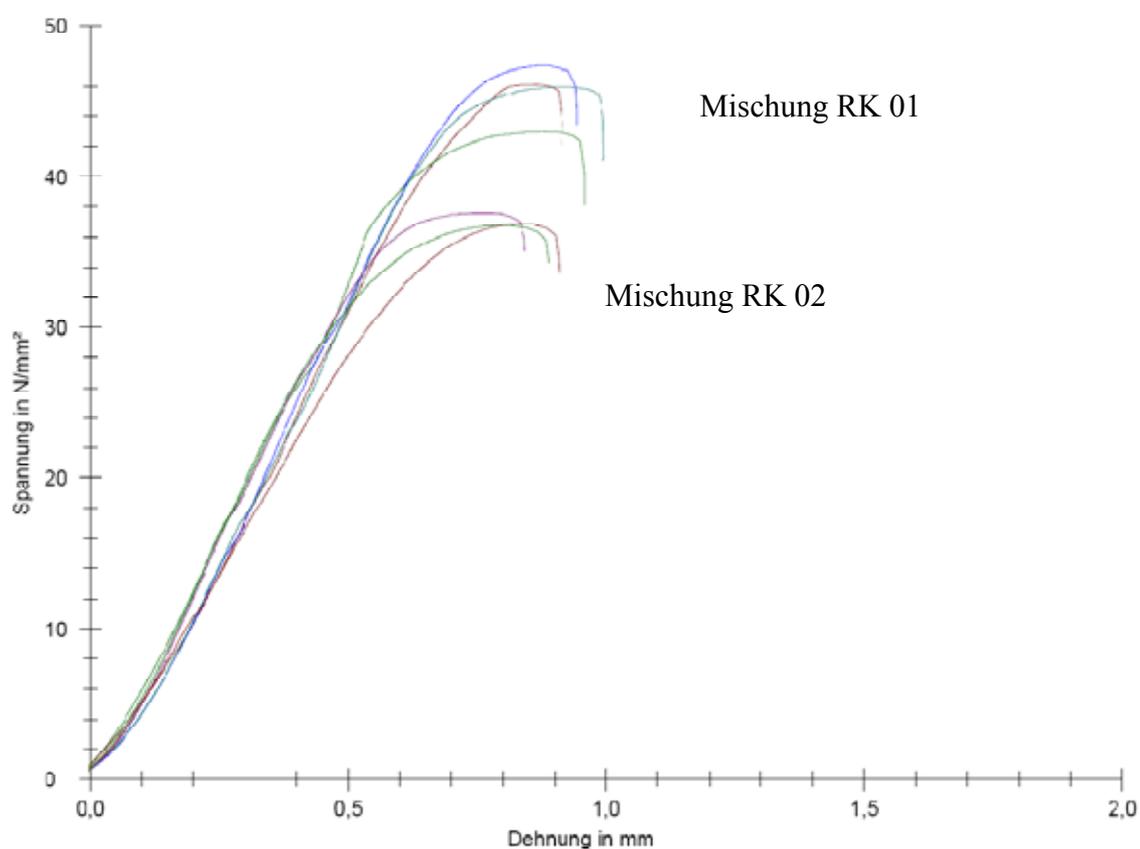
Mischung RK 01      betoniert: 13.12.06      geprüft: 12.01.07



Ergebnisprotokoll:

Nr	Probennummer	A mm <sup>2</sup>	Probendicke a <sub>0</sub> mm	Probenbreite b <sub>0</sub> mm	F <sub>max</sub> kN	σ <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>m</sub> mm	W <sub>m</sub> Nm	W <sub>b</sub> Nm
1	1	22246	148,9	149,4	1025,17	46,08	0,85	475,84	539,39
2	2	22515	150,7	149,4	966,67	42,94	0,87	521,05	601,41
3	3	22574	151,1	149,4	1068,76	47,34	0,88	527,88	592,96
4	4	22709	152	149,4	1043,07	45,93	0,91	554,13	638,93
5	5	22515	150,7	149,4	845,30	37,54	0,76	385,61	457,71
6	6	22679	151,8	149,4	835,42	36,84	0,83	413,21	475,71
7	7	22276	149,1	149,4	818,61	36,75	0,80	410,33	484,38

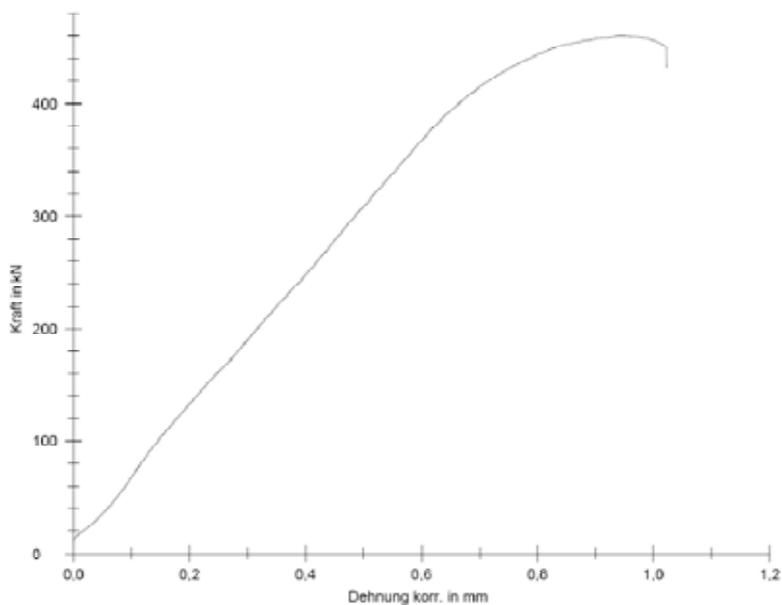
Seriengrafik:



## 12.4 Restfestigkeitsuntersuchung nach Brandversuch

Probewürfel M-HV PW2 (Probennr.1 in Ergebnisprotokoll)

Mischung RK 02 Brandversuch am 12.01.07, 17min ETK



Ergebnisprotokoll:

Nr	Probennummer	A mm <sup>2</sup>	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	F <sub>max</sub> kN	σ <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>m</sub> mm	W <sub>m</sub> Nm	W <sub>b</sub> Nm
1	1	22648	151,6	151,5	360,02	15,90	1,66	323,28	352,41