

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT Master's Thesis

Abhängigkeit des Betontemperaturverhaltens von der Bauteildicke unter
Brandbelastung

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

Christoph KOSCH

e0125231

Aribogasse 9/6, 1220 Wien

Wien, im April 2007

Vorwort

Besonderer Dank gilt vor allem meinen Eltern, die mir durch Ihre persönliche und finanzielle Unterstützung dieses Studium überhaupt erst ermöglichten, meinem Bruder und meiner Freundin. Nicht zuletzt deren Unterstützung und Rücksichtnahme ermöglichte die erfolgreiche Bewältigung aller Prüfungen sowie die Erstellung der vorliegenden Arbeit.

Die vorliegende Arbeit ist am Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz der Technischen Universität Wien unter Hilfestellung von O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.Dr.h.c. Ulrich Schneider, der Institutsmitarbeiter Heinrich Bruckner, Shangwei Chen, Hubert Kirchberger und Johannes Kirnbauer sowie meines Studienkollegen Gerhard Matzinger entstanden. Für die fachliche Zusammenarbeit und Beratung bedanke ich mich herzlich bei den genannten Kollegen. Dem Institut danke ich für die Möglichkeit, im Rahmen dieser Diplomarbeit eine Vielzahl aufwendiger und schwieriger Brandversuche in der Brandschutzabteilung durchführen zu dürfen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Beton	3
2.1.1	Betoneigenschaften	3
2.1.1.1	Betonfestigkeit	3
2.1.1.2	W/B-Wert	3
2.1.1.3	Einfluss auf die Betonfestigkeit	4
2.1.2	Betonsorten	6
2.1.3	Frischbetonprüfung	7
2.1.3.1	Bestimmung des Ausbreitmaßes f	8
2.1.3.2	Bestimmung des Luftporenanteils	8
2.1.4	Nachbehandlung des Betons	10
2.1.5	Nachweise am Festbeton	11
2.1.5.1	Bestimmung des Wassergehaltes	12
2.1.5.2	Druckfestigkeitsbestimmung	12
2.1.5.3	Restfestigkeitsuntersuchung nach erfolgtem Brandversuch	14
2.1.6	Klassifizierung von Beton	14
2.1.7	Faserbeton	16
2.1.8	Grenzsieblinien	17
2.2	Betonverhalten bei Brand	18
2.2.1	Nichtbrennbarkeit von Beton	18
2.2.2	Betonabplatzungen	18
2.2.3	Typische Betoneigenschaften unter Brandbelastung	22
2.2.3.1	Temperaturverteilung bei einseitig beanspruchten Betonwänden	22
2.2.3.2	Temperaturverteilung in feuchtem Faserbeton	23
2.2.3.3	σ - ε -Diagramme bei hohen Temperaturen	24
2.2.3.4	E-Modul und Dehnungsverhalten	25
2.2.4	Berechnung der Temperaturverteilungen in Stahlbetonbauteilen	26
2.3	Brandkurven	28
2.3.1	Einheitstemperaturkurve ETK	28
2.4	Feuerwiderstandsprüfungen gemäß ÖNORM	30
3	Vorversuche und Versuchsplanung	32
3.1	Versuchsplanung	33
3.2	Betonmischungen	34
3.2.1	Betonausgangsstoffe	34
3.2.2	Betonmischung RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	35
3.3	Probekörperherstellung	36
3.4	Betonprüfung lt. ÖNORM B 3303	37
3.4.1	Herstellung der Probemischungen	37
3.4.1.1	Geräte und Lagerräume	38
3.4.1.2	Betonkomponenten	39
3.4.2	Frischbetonprüfung	39
3.4.2.1	Ausbreitmaß	39

3.4.2.2	Luftporenanteil	39
3.4.3	Festbetonprüfung	40
3.4.3.1	Druckversuche	40
3.4.3.2	Wassergehalt	40
3.5	Vorversuch-Brandversuche	41
3.5.1	Platte KM-VV12-1 RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	43
3.5.2	Platte KM-VV12-3 RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	43
3.5.3	Platte KM-VV12-2 RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	44
3.6	Resümee Vorversuche	44
4	Hauptversuche	45
4.1	Betonmischungen	45
4.1.1	Betonausgangsstoffe	45
4.1.2	Sieblinien der Gesteinskörnungen	46
4.1.3	Betonmischung RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	48
4.1.4	Betonmischung RK02 (ohne PP-Fasern)	49
4.1.5	Betonmischung RK01* (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	50
4.2	Probekörperherstellung	51
4.3	Betonprüfung	52
4.3.1	Frischbetonprüfung	52
4.3.2	Festbetonprüfung	53
4.3.2.1	Druckversuche	53
4.3.2.2	Wassergehalt	54
4.4	Brandversuchsdurchführung	56
4.4.1	Platte KM-HV8-1 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	57
4.4.2	Platte KM-HV8-2 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	58
4.4.3	Platte KM-HV8-3 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	58
4.4.4	Platte KM-HV16-1 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	59
4.4.5	Platte KM-HV16-2 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	59
4.4.6	Platte KM-HV16-3 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60
4.4.7	Platte KM-HV12-1 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60
4.4.8	Platte KM-HV20-1 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	61
4.4.9	Platte KM-HV20-2 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	61
4.4.10	Platte KM-HV20-3 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	62
4.4.11	Platte KM-HV12-2 RK01* (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	62
4.4.12	Platte KM-HV12-3 RK01* (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	63
4.4.13	Platte KM-HV12-1 RK02 (ohne PP-Fasern)	63
4.4.14	Platte KM-HV12-2 RK02 (ohne PP-Fasern)	64
4.4.15	Platte KM-HV12-3 RK02 (ohne PP-Fasern)	64
4.4.16	Probewürfel	65
4.5	Restfestigkeitsuntersuchungen	66
5	Brandversuchsauswertung	70
5.1	Vorgangsweise während der Versuchsauswertung	71
5.2	Temperaturkurven Brandversuche	72
5.3	Brandkammertemperaturen	84
5.4	Sonstige Beobachtungen	84

5.5	Versuchsauswertung	87
5.5.1	Gemittelte Temperaturverläufe je Prüfserie	87
5.5.2	Mittlere Brandkammertemperaturen der Prüfserien	91
5.5.3	Vergleich der mittleren Temperaturkurven	91
5.5.4	Temperaturverteilungen in Abhängigkeit der Branddauer	93
5.6	Temperatursimulationen und –berechnungen	96
5.6.1	Simulation mittels der Berechnungssoftware <i>MRFC Version 2.5</i>	96
5.6.1.1	Dateneingabe	96
5.6.1.2	Vergleich Simulation – Messergebnisse, Iteration der Stoffwerte	99
5.6.1.3	Simulationsauswertung der Plattendicken 4, 8, 20 und 24 cm	101
5.7	Schlussbetrachtung der Versuche bzw. Simulationen	105
6	Zusammenfassung und Ausblick	106
7	Summary	109
8	Literaturverzeichnis	111
9	Abbildungsverzeichnis	115
10	Tabellenverzeichnis	120
11	Anhang	121
11.1	Druckversuche	121
11.1.1	Vorversuche	121
11.1.2	Hauptversuche	122
11.1.3	Restfestigkeitsuntersuchungen	126
11.2	Ergänzende Fotodokumentation	129
11.3	Simulierte Temperaturverläufe	130
11.4	Zusammenfassende Datenaufstellung	133

1 Einleitung

Die Kenntnis des Materialverhaltens der verschiedenen Baustoffe bildet die Grundlage für die Arbeit eines jeden Bauingenieurs, weshalb es umso wichtiger ist, das Materialverhalten der Baustoffe hinreichend genau zu untersuchen, um die jeweiligen Konstruktionen sowohl unter Normalbeanspruchung, als auch unter Extrembelastung, wie z.B. Brand, bewerten zu können.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde für den Baustoff Beton (genauer: Normalbeton) die Abhängigkeit des Temperaturverhaltens von der Bauteildicke unter Brandeinwirkung untersucht. Ziel sollte sein, etwaige Zusammenhänge der Temperatureindringtiefen in verschieden starken Betonplatten zu erkennen, diese zu dokumentieren und zu beschreiben, um nachfolgend einen Vergleich mit den Ergebnissen einer bestehenden Simulationssoftware durchzuführen.

Der Untersuchung zu Grunde gelegt wurden Probekörper mit den Abmessungen 50 cm (Prüfkörperbreite) mal 60 cm (Prüfkörperlänge). Die Prüfkörperdicken sollten den Bereich zwischen 8 cm und 20 cm abdecken, weshalb seitens des zuständigen Betreuers entschieden wurde, die Plattendicken 8 cm, 12 cm, 16 cm und 20 cm zu untersuchen.

Im Zuge der Vorgespräche wurde ebenfalls entschieden 3 Serien je Bauteildicke zu fertigen, um nicht aussagekräftige bzw. fehlerhafte Messungen eliminieren zu können, und trotzdem noch repräsentative Ergebnisse der verbleibenden 2 Platten je Bauteildicke nutzen zu können. Diese Betonplatten sollten während der Brandversuche keine Abplatzungen haben bzw. aufweisen.

Zum Vergleich sollte eine Probekörperserie (Plattendicke 12 cm) mit massiv auftretenden Abplatzungen während der Brandversuche hergestellt und untersucht werden.

Betreffend der Probewürfel ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$) wurde entschieden 2 Probekörper je Mischung herzustellen um einen Würfel nach 28 Tagen zur Druckfestigkeitsprüfung heranzuziehen und den Verbleibenden nach der Brandbeanspruchung einer Restdruckfestigkeitsprüfung zu unterziehen.

Sämtliche Betonprobekörper wurden eigens für diese Diplomarbeit am Institut für Hochbau und Technologie / Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz (Laborgebäude Aspanggründe) hergestellt und geprüft.

In Kapitel 2 „Grundlagen“ werden zunächst all jene Themen behandelt, welche im Zuge der Bearbeitung dieser Diplomarbeit von Wichtigkeit sind. Das Kapitel umfasst dabei die Themen Betongrundlagen (Betoneigenschaften, -sorten, -prüfmethoden, Faserbeton und Grenzsieblinien), Betonverhalten bei Brand (Stoffeigenschaften, Betonabplatzungen sowie Temperaturverläufe) und genormte Brandkurven (Einheitstemperaturkurve und Kohlenwasserstoffkurve).

Kapitel 3 „Vorversuche + Versuchsplanung“ beschäftigt sich mit der Herangehensweise an die durchzuführenden Versuche, mit dem Ziel die Arbeitsgänge während des Betonierens, der Frisch- und Festbetonprüfung und der Brandversuche kennen zu lernen, zu automatisieren und wenn möglich zu verbessern. Alle Vorversuchsarbeitsschritte, sowie Betonrezepturen und Druckfestigkeitsuntersuchungen während der Vorversuche sind in diesem Kapitel dokumentiert.

Kapitel 4 „Hauptversuche“ umfasst die gesamte Dokumentation der Hauptversuche inklusive einer Restfestigkeitsuntersuchung der brandgetesteten Probewürfel. Die Hauptversuchsdokumentation beinhaltet die Prüfkörperherstellung, Prüfkörpernachbehandlung, Frisch- und Festbetonprüfungen und die fotodokumentierten Brandversuche.

Kapitel 5 „Brandversuchsauswertung“ stellt das Herzstück dieser Arbeit dar und zeigt messtiefen- und branddauerabhängige Temperaturverläufe, welche die Abhängigkeit dieser Temperaturkurven von der Bauteildicke dokumentieren und darstellen.

Ebenfalls enthalten ist eine Gegenüberstellung der gemessenen Daten mit Bauteiltemperaturwerten einer Computer-Brandsimulation mittels der Brandsimulationssoftware *MRFC Version 2.5*.

Abschließend gibt es im Kapitel 6 „Zusammenfassung und Ausblick“ eine zusammenfassenden Darstellung der gewonnen Erkenntnisse.

Im Anhang (Kapitel 11) sind Druckversuchsprotokollauszüge, Fotos, Temperaturverlaufdiagramme und eine Übersicht aller Probekörper und deren wesentliche Versuchsdaten ergänzend angeführt.

2 Grundlagen

2.1 Beton

Beton ist ein Baustoff, der durch das Mischen von einem Bindemittel (z.B. Zement für Zementbeton, Bitumen für Asphaltbeton, Kunststoffe für Polymerbeton), Gesteinskörnungen (z.B. Sand), Wasser und evt. Zusätzen entsteht (VÖZ, S.3/[37]). Nach dem Mischen, z.B. in einem Zwangsmischer, kann der Frischbeton in entsprechende Formen gegossen werden, um so, nach Beendigung des Erhärtungsprozesses, einen künstlichen Stein zu bilden.

Das Mischverhältnis der Betoninhaltsstoffe zueinander ist variabel, jedoch ist es unerlässlich die Auswirkungen der Zugabe der einzelnen Bestandteile zu kennen, um, unter eventueller Beimengung von Zusätzen (z.B. Luftporenmittel, Verflüssiger, Erstarrungsverzögerer), die erforderlichen Betoneigenschaften zu erhalten. Diese Zusatzstoffe sind nach Masse zu dosieren. Weiters ist die homogene Vermischung von Bindemitteln, Wasser, Gesteinskörnungen und Zusatzstoffen sicherzustellen und zu protokollieren.

2.1.1 Betoneigenschaften

2.1.1.1 Betonfestigkeit

Das Erreichen der erforderlichen Betonfestigkeiten wird vor allem durch die Wahl des Bindemittels beeinflusst. Zu erreichende Einzel- bzw. Mittelwerte gemäß ÖNORM B 4710-1 führen zu einer Einteilung in Betonfestigkeitsklassen. Dabei werden Prüfkörper hergestellt und nach 28 Tagen mittels Pressen zentrisch druckbelastet, wobei die Bruchlast maßgebend für die Festigkeitseinstufung ist.

2.1.1.2 W/B-Wert

Maßgebend für die Güte des Betons ist u.a. das Masseverhältnis von Wasser zu Bindemittel in der frischen Betonmischung. Je niedriger der W/B-Wert, desto höher 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 unter Verwendung spezieller Fließmittel und Zusatzstoffe evtl. sehr hohe Festigkeiten (schon innerhalb der ersten Tage des Aushärtens). W/B-Werte von 0,4 bis 0,7 stellen das Zement-Wasser-Verhältnis von Normalbeton dar (ca. 0,55). Betone mit W/B-Werten über 0,7 sind im Allgemeinen sehr porös und wasserdurchlässig.

In der Praxis darf ein W/B-Wert von 0,7 nie überschritten werden, da sich ab einem Wert von ca. 0,7 der durch das überschüssige Wasser entstandene große Porenanteil untereinander vernetzt, und so eine sehr starke Wasserdurchlässigkeit möglich wird. Dies führt zu einem Festigkeitsverlust des Betons (*Schneider*, S.28/[13]).

2.1.1.3 Einfluss auf die Betonfestigkeit

Der folgende Abschnitt beschränkt sich nur auf jene Einflüsse, welche Auswirkungen auf die Betondruckfestigkeit haben. Weitere, bestimmbare, Betonfestigkeiten sind die Zugfestigkeit, die Biegezugfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit, der Verschleißwiderstand und das Festigkeitsverhalten bei Schlagbeanspruchung - diese werden jedoch in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Bevor die weiteren Auswirkungen des verwendeten Mischungsverhältnisses von Bindemittel (im gegenständlichen Fall: *Portlandhüttenzement EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42*) zu Wasser behandelt wird, ist es unerlässlich die auftretenden Reaktionen beim Mischen dieser Betonkomponenten zu beschreiben. Der chemische Vorgang dazu wird als Hydratation bezeichnet und läuft gemäß Tabelle 2-1 ab (*Schneider*, S.41f/[14]):

Tabelle 2-1: PZ-Klinkerphasen, ihre Eigenschaften und Massenanteile (*Schneider*, S.39/[14])

Klinkerphasen	Chemische Formel	Kurzbezeichnung	Eigenschaften	Massenanteile im Klinker %
Tricalciumsilicat	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	schnelle Erhärtung, hohe Hydratationswärme, hohe Festigkeit	45 - 80
Dicalciumsilicat	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	langsame, stetige Erhärtung, niedrige Hydratationswärme, hohe Festigkeit	0 - 32
Tricalciumaluminat	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	schnelle Reaktion mit H_2O , hohe Hydratationswärme, geringe Festigkeit, anfällig gegen Sulfatwasser	7 - 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 CaO (Freikalk)	CaO	C	in geringen Mengen unschädlich, sonst Kalktreiben	0,1 - 3
freies MgO (Periklas)	MgO	M	in größeren Mengen Treiben	0,5 - 4,5

Die Hydratationsprodukte bilden sich, insbesondere zu Beginn des Vorganges, nicht gleichzeitig, sondern nacheinander, beginnend mit **Hydratationsstufe I**. Kurz nach dem Anmachen kommt es im plastischen Zementleim zur Bildung von Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und Trisulfat. Im Verlauf des Erstarrungsprozesses entwickeln sich die feinen Nadeln und versteifen nach 1 bis 3 Stunden so den Zementleim. **Hydratationsstufe II** setzt nach 4 bis 8 Stunden ein und zeichnet sich durch die Bildung von CSH-Kristallen aus, die den Raum zwischen den Zementteilchen überbrücken und ein poriges Gefüge bilden – die Erstarrung setzt ein. Dabei kann gemäß DIN 1164 ein Erstarrungsbeginn nach frühestens einer Stunde, sowie ein Erstarrungsende nach spätestens 12 Stunden angesetzt werden. Während **Hydratationsstufe III** nimmt der Porengehalt durch kurzfasriges Kalkhydroxysilikat und Aluminatprodukte weiter ab, wodurch es zu einer Erhärtung des Zementsteins kommt. Der Hydratationsvorgang kann dabei schon durch kleine, unwesentlich erscheinende, Verunreinigungen (z.B. Salze o. ä.) deutlich verkürzt bzw. verlängert werden. Kommt es dabei zu einer Beschleunigung der Erhärtung ist die Anfangsfestigkeit zwar höher, die Endfestigkeit aber meist niedriger, da wegen der Abkürzung der zweiten Hydratationsphase weniger langfaserige Kalkhydroxysilikate entstehen (*Huber, Riccabona, S.81/[35]*).

Die Hydratation ist ein exothermer Vorgang, wodurch es in dicken Bauteilen zu einer temperaturbedingten Ausdehnung, gefolgt von einer Abkühlung und dem damit verbundenen Zusammenziehen kommt und dadurch Risse infolge der nun auftretenden Zugspannungen entstehen.

Der unter 2.1.1.2 behandelte **W/B-Wert** bildet den wichtigsten Einfluss auf die Betondruckfestigkeit, wodurch der Bindemittelgehalt, bei gleich bleibender Wassermenge, über den W/B-Wert indirekt starken Einfluss auf die Festigkeit hat. Steigert man den Wasseranteil im gleichen Maße wie den Zementgehalt, bleiben Struktur und Porosität des Zementsteins unverändert. Ein minimaler Betondruckfestigkeitsrückgang ist jedoch die Folge, da die Dicke der Zementhüllen um die Zuschlagskörner zunimmt.

Einen weiteren, enorm wichtigen Einfluss stellt das **Betonalter** dar (Abbildung 2-1), insbesondere unter Berücksichtigung, dass die Endfestigkeit unter Umständen erst nach Jahren erreicht wird. Die verwendete Zementgüteklasse hat dabei auch entscheidende Auswirkungen auf die Nacherhärtung des Betons. Der W/B-Wert spielt hingegen eine geringere Rolle (s. Abbildung 2-1).

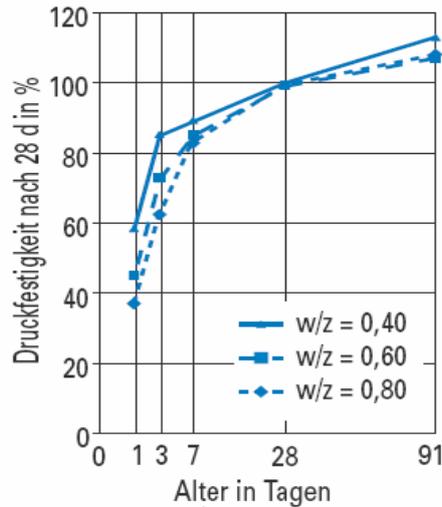


Abbildung 2-1: Betondruckfestigkeit mit CEM I 32,5 R in Abhängigkeit der Zeit [37]

Auch das **Umgebungs-klima** beeinflusst die Betonfestigkeit – bei niedrigen Temperaturen verzögert sich die Festigkeitsentwicklung, während bei höheren Temperaturen eine Beschleunigung stattfindet. Insbesondere bei der Herstellung von Betonfertigteilen kommt es zu einer Nutzung dieses Sachverhalts um ein rasches Ausschalen und Vorspannen zu gewährleisten.

Die erforderliche **Verdichtung** des Frischbetons führt zu einer Reduktion der Luftporen mit dem Ziel eine möglichst dichte Lagerung der festen Stoffkomponenten zu erreichen. Je weniger sichtbare Poren auf einem Prüfwürfel festgestellt werden können, desto höher wird bei der Druckfestigkeitsprüfung die erreichte Betondruckfestigkeit sein.

Die Wahl der **Kornzusammensetzung** erfolgt unter dem Gesichtspunkt der Optimierung des erforderlichen Wasseranspruches zur Erreichung einer bestimmten Konsistenzklasse - die **Kornfestigkeit** des Zuschlages hat bei Normalbetonen keine Auswirkungen auf die Druckfestigkeit, weil sie in der Regel über 100 N/mm² beträgt.

Bezüglich der Wirkungsweisen von **Betonzusatzmitteln** oder **-stoffen** sind hinsichtlich der Festigkeit keine allgemeinen Aussagen möglich (*Schneider*, S.28ff/[13]).

2.1.2 Betonsorten

Je nach Wahl der Betoninhaltsstoffe ist eine bedarfsgerechte Anpassung der Betoneigenschaften möglich, insbesondere in den Bereichen Betonfestigkeit, Schallschutz und Wärmedämmfähigkeit, wobei hierbei vor allem die gewählte Gesteinskörnung Einfluss ausübt. Bei den Betonsorten unterscheidet man demnach:

- Leichtbeton (Rohdichte $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$)
- Normalbetone (Rohdichte zwischen 2000 und 2600 kg/m^3)
- Schwerbetone (Rohdichte über 2600 kg/m^3).

Tabelle 2-2 gibt beispielhaft Auskunft über die zu verwendenden Gesteinskörnungen zum Erreichen der gewünschten Betonsorte:

Tabelle 2-2: Zuschläge für Leicht-, Normal- und Schwerbeton (*Schneider*, S.6.5/[38])

Trockenrohddichte	Zuschläge, zum Beispiel
$\leq 2,0$	Naturbims, Hüttenbims, Blähton, Blähschiefer
$> 2,0 \dots 2,8$	natürliches ungebrochenes oder gebrochenes dichtes Gestein (z. B. Sand, Kies, Splitt), künstlich hergestellte gebrochene oder ungebrochene dichte Zuschläge (z. B. Hochofenbrech-sand, Hochofenschlackensplitt)
$> 2,8$	Schwerspat, Eisenerz, Stahlsand, Stahlschrott

2.1.3 Frischbetonprüfung

Als Frischbeton wird der Beton bis zu jenem Zeitpunkt bezeichnet zu dem eine bedarfsgerechte Verarbeitung noch möglich ist.

Zu den Frischbetonprüfungen lt. ÖNORM B 3303 zählen:

- Konsistenz (Ausbreitmaß f , Verdichtungsmaß c)
- Frischbeton-Rohdichte ρ_{FB}
- Luftgehalt des Frischbetons A_c
- Gesamtwassergehalt des Frischbetons W (Mikrowellenverfahren, Rasches Trocknen mit Röstmethode oder Spiritusmethode)
- Anrechenbarer Bindemittelgehalt des Frischbetons B (Bestimmung aus Einwaagen, Bestimmung aus der Stoffumrechnung)
- Bestimmung des W/B -Wertes
- Bluten von Beton B_w
- Prüfung der verzögerten Anfangserhärtung des Betons
- Prüfung der Mischwirkung der Mischmaschine
- Prüfung der Gleichförmigkeit des Frischbetons.

Im Folgenden wird nur auf jene Frischbetonprüfverfahren näher eingegangen, welche bei der Probekörperherstellung im Zuge dieser Diplomarbeit angewendet wurden.

2.1.3.1 Bestimmung des Ausbreitmaßes f

Die Ermittlung des Ausbreitmaßes lt. ÖNORM EN 12350-5 dient der Bestimmung der Betonkonsistenz durch Messung der Ausbreitung von Beton auf einer flachen Platte, die auf einen Rahmen fallengelassen wird.

Für die Bestimmung des Ausbreitmaßes wird eine Metallform, in Form eines Kegelstumpfs, mit zwei gleichen Betonschichten aufgefüllt und mit einem Stößel verdichtet. Der darunter befindliche Arbeitstisch, genauer die Aufschlagplatte, wird nach dem Befüllen und vertikalen Aufheben der Metallform bis zu einem Anschlagpunkt hochgehoben und darauf hin wieder fallen gelassen. Dieser Vorgang wird 15 mal wiederholt und danach das Höchstaubreitmaß in zwei, orthogonal zueinander befindlichen, Richtungen gemessen (cm-Genauigkeit).

Nach Bestimmung des Ausbreitmaßes zu $(d_1+d_2)/2$ kommt es gemäß ÖNORM B 4710-1 Tab. 6 zu einer Klassifizierung (Tabelle 2-3):

Tabelle 2-3: Ausbreitmaßklassen gemäß ÖNORM B 4710-1

Tabelle 6 – Ausbreitmaßklassen

Klasse	Klassenbezeichnung in Österreich	Ausbreitmaß in mm (Durchmesser)	Beschreibung
F1 ¹⁾	---	≤ 340	--
F2	F38	350 bis 410	plastisch
F3	F45	420 bis 480	weich
F4	F52	490 bis 550	sehr weich
F5	F59	560 bis 620	fließfähig
F6 ¹⁾	--	≥ 630	--
	F66	630 bis 690	sehr fließfähig
	F73	700 bis 760	extrem fließfähig

¹⁾ in Österreich nicht relevant

2.1.3.2 Bestimmung des Luftporenanteils

Bei der Prüfung gemäß DIN 1048 - Teil 1 (Ausgabe 1991) wird zwischen einem mit Beton und einem mit Druckluft gefüllten Behälter Druckausgleich hergestellt. Der durch die Frischebetonluftporen bedingte Druckabfall kann als prozentualer Luftgehalt auf einem Manometer abgelesen werden (Abbildung 2-2).

Die Prüfdurchführung erfolgt folgendermaßen:

- Wiegen des leeren Topfes und Betoneinbringung

- Verdichten des Betons
- Wiegen des gefüllten Topfes (auf 0,020 kg Genauigkeit)



Abbildung 2-2: Luftporenmessapparatur

- Errechnung der Rohdichte: $\rho_b = \frac{m_1 - m_2}{8} \cdot 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- Deckelunterseite aufsetzen und kreuzweise Anziehen
- Öffnen beider Deckelhähne, einseitige Einbringung von Wasser bis am zweiten Deckelhahn Wasser austritt
- Pumpenstange der eingebauten Luftpumpe durch Linksdrehen des Knopfes aus Arretierung lösen und so lange pumpen bis die Manometeranzeige hinter der roten Eichmarkierung zum Stehen kommt
- Manometeranzeige mittels des Feinregulierungsventils auf rote Eichmarkierung einregulieren
- Beide Ventilhähne schließen und Daumenhebel einige Sekunden kräftig herunterdrücken um ein Einströmen der Druckluft zu ermöglichen
- Ablesen des prozentualen Frischbetonluftgehaltes am Manometer
- Ablassen des Druckes und Behälterreinigung.

2.1.4 Nachbehandlung des Betons

Diese hat in Österreich im Zuge der Betonprüfung nach ÖNORM B 3303 zu erfolgen und erfordert ein Verbleiben in der Schalung (mindestens 16 Stunden aber längstens 3 Tagen), wobei die Probekörper vor Stoss, Rütteln und Austrocknung zu schützen sind. Bei der Druckfestigkeitsprüfungen erfolgte eine Wasserlagerung bis zum Alter von 7 Tagen, danach bei Raumluft im Labor bis zum Brandversuch (Abbildung 2-3). Diese Maßnahme soll einen ungestörten Ablauf der Hydratation ermöglichen.



Abbildung 2-3: Wasserlagerung der Prüfkörper

In der Baustellenpraxis stehen je nach den herrschenden Klimabedingungen verschiedene Nachbehandlungsmöglichkeiten zur Verfügung. So werden z.B. im Winter bei tiefen Temperaturen Folien, trockene Platten, Planen oder beheizte Zelte zur Gewährleistung einer Mindesttemperatur von ungefähr 10 °C vorgesehen, während im Sommer vor allem das zu schnelle Austrocknen verhindert werden muss. Dies kann durch feuchte Matten, das Auftragen von Nachbehandlungsfilmen oder Abdeckfolien geschehen. Im Labor wurden die Proben nicht abgedeckt.

2.1.5 Nachweise am Festbeton

Zu den Festbetonprüfungen zählen lt. ÖNORM B 3303:

- Rohdichte von Festbeton D
- Druckfestigkeit f_c von Probekörpern
- Biegezugfestigkeit f_{ct} von Probekörpern bei mittigem Lastangriff
- Spaltzugfestigkeit f_t von Probekörpern
- Abreißfestigkeit f_A
- Bestimmung von Luftporen-Kennwerten im Festbeton A, L, A300, L300
- Statischer Elastizitätsmodul E_b von Probekörpern
- Wassereindringtiefe in Probekörper
- Prüfung zur Beurteilung einer gleichwertigen Beständigkeit für die Frostklasse XF1
- Prüfung zur Beurteilung einer gleichwertigen Beständigkeit für die Frostklasse XF3
- Prüfung zur Beurteilung einer gleichwertigen Beständigkeit für die Frostklasse XF2 und XF4
- Messung der Längenänderung ε von Betonprobekörpern infolge Feuchtigkeitsänderung, Temperaturänderung oder chemische Reaktionen
- Prüfung zum Nachweis eines gleichwertigen bzw. reduzierten Schwindens
- Prüfung zur Beurteilung einer gleichwertigen Beständigkeit gegen lösenden Angriff
- Ermittlung der Trockenrohichte D_{tr} aus der Frischbeton-Rohdichte
- Verträglichkeit von Fließmitteln und/oder Verflüssigern mit luftporenbildenden Zusatzmitteln
- Prüfung des Temperaturanstieges des Betons durch Hydrationswärme.

Im Vorfeld von Instandsetzungs-, Umbau- oder Verstärkungsarbeiten können bei Verdacht auf äußerlich nicht sichtbare Schäden, Prüfungen betreffend der Carbonatisierungstiefe, dem Chloridgehalt, der Abreißfestigkeit und dem Aufspüren von Spankanalhohlstellen angeordnet werden.

Im weiteren Verlauf dieses allgemeinen Kapitels wird nur auf jene Festbetonprüfungsverfahren näher eingegangen, welche im Zuge dieser Diplomarbeit angewendet wurden.

2.1.5.1 Bestimmung des Wassergehaltes

Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgt nach folgender Beziehung:

$$\frac{m_{\text{feucht}} - m_{\text{trocken}}}{m_{\text{trocken}}} \cdot 100 = w[\%]$$

Die Trocknung der Proben erfolgte im Zuge der vorliegenden Arbeit in Trockenschränken bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz.

2.1.5.2 Druckfestigkeitsbestimmung

Die Einteilung des Betons in Druckfestigkeitsklassen erfolgt nach ÖNORM B 4710-1 (Tabelle 2-4), während die Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit gemäß ÖNORM B 3303 erfolgt, welche wiederum die ÖNORM EN 12390-1 bis 3 zitiert.



Abbildung 2-4: Druckfestigkeitsbestimmung

Die Ermittlung von $f_{c,150}$ (entspricht jenem Wert, der mittels Druckprüfung am Probewürfel mit den Seitenabmessungen von 150 mm direkt ermittelt wird) erfolgt mit einer hydraulischen Prüfmaschine (Abbildung 2-4). Die dadurch erhaltene, maximal aufnehmbare Kraft F_{\max} liefert unter Berücksichtigung des Würfelquerschnitts F_0 die vorhandene Maximalspannung $[N/mm^2]$ bei Versagen der Würfeldruckfestigkeit:

$$f_c = \frac{F_{\max}}{F_0}$$

Ausgehend davon wird nun f_c mit dem Faktor 0,92 multipliziert, um die unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden zwischen ÖNORM EN 12390-3 (Wasserlagerung bis zur Druckprüfung) und ÖNORM B 3303 (7-Tage Wasserlagerung) bezüglich der Wasserlagerung berücksichtigen zu können und eine Einteilung in eine Festigkeitsklasse nach ÖNORM B 4710-1 vornehmen zu können.

Bevor diese Einteilung möglich ist muss aus den „n“ erhaltenen f_c -Werten die mittlere Betondruckfestigkeit f_{cm} (entspricht dem arithmetischen Mittel aller ermittelten Einzelfestigkeiten) gebildet werden.

Bei der Betonherstellung in Betonwerken müssen die so genannten Konformitätskriterien lt. ÖNORM B 4710-1 erfüllt werden.

Tabelle 2-4: Festigkeitsklasseneinteilung gemäß ÖNORM B 3303

Tabelle NAD 13 – Festigkeiten $f_{c,150\text{ mm}}$ für Erst- und Konformitätsprüfung bei Lagerung nach ÖNORM B 3303
(fortgesetzt auf Seite 65)

Spalte	1	2	3		
Festigkeits- klasse	Mindestdruckfestigkeit von 15-cm-Würfel (N/mm²)				
	Konformitätsprüfung		Erstprüfung		
	Einzelprüfung	MW von jeweils 3 Einzelprüfungen ¹⁾	2)	3)	4)
C8/10	7	15	17	19	23
C12/15	12	20	22	24	28
C16/20	18	26	28	30	34
C20/25	23	31	33	35	39
C25/30	29	37	39	41	(45)
C30/37	36	44	46	48	5)

Spalte	1	2	3		
Festigkeits- klasse	Mindestdruckfestigkeit von 15-cm-Würfel (N/mm²)				
	Konformitätsprüfung		Erstprüfung		
	Einzelprüfung	MW von jeweils 3 Einzelprüfungen ¹⁾	2)	3)	4)
C35/45	45	53	55	57	/
C40/50	50	58	60	62	/
C45/55	56	64	66	68	/
C50/60	61	69	71	73	/
C55/67	69	77	79	81	/
C60/75	74	84	85	87	/
C70/85	84	94	95	97	/
C80/95	95	105	106	5)	/
C90/105	106	116	117	/	/
C100/115	116	126	127	/	/

¹⁾ in der Reihe (Kriterium 1 gemäß Tabelle 14)
²⁾ Mikroprozessorsteuerung mit automatischer Feuchtekorrektur und SOLL-IST-Vergleich
³⁾ massemäßige Dosierung aller Ausgangsstoffe
⁴⁾ massemäßige Dosierung der Ausgangsstoffe außer der Gesteinskörnung, der volumetrisch dosiert wird.
Diese Herstellung ist nur für die Klassifikation gemäß Abschnitt 4 für XC0, XC1 und XC2 zulässig.
⁵⁾ mit diesem Verfahren nicht herstellbar

2.1.5.3 Restfestigkeitsuntersuchung nach erfolgtem Brandversuch

Die Restfestigkeitsuntersuchung erfolgt als Druckversuch und unterliegt daher auch den selben Vorgaben wie die 28-Tage-Druckfestigkeitsuntersuchungen.

Hierbei sind entsprechend flachere Spannungs-Dehnungsverläufe als jene während der 28-Tage-Festigkeitsuntersuchungen zu erwarten. Diese Aussage ist jedoch nur für Brandbelastungen > 200 °C gültig, da bei Temperaturen bis 100 °C überhaupt keine Schädigungen und bei Temperaturen von 100 - 200 °C nur geringfügige bis keine Schädigungen zu beobachten sind (*Kordina, Meyer-Ottens, [29]*).

2.1.6 Klassifizierung von Beton

Die Einteilung von Festbeton in Betonsorten wird in erster Linie anhand der vorhandenen Druckfestigkeitsklasseneinteilung vorgenommen. Tabelle 2-5 zeigt die Druckfestigkeitsklassen gemäß ÖNORM B 4710-1.

Tabelle 2-5: Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwerbeton gemäß ÖNORM B 4710-1

Druckfestigkeitsklasse	charakteristische Druckfestigkeit von Zylindern $f_{ck,cyl}$ [N/mm²], mindestens	charakteristische Druckfestigkeit von Würfeln $f_{ck,cube}$ [N/mm²], mindestens
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Bei zusätzlichen Umweltbelastungen existiert gemäß ÖNORM B 4710-1 die Möglichkeit der Einteilung in Expositionsklassen. Folgende Expositionsklassen sind vorgesehen:

- Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko (X0)
- Korrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung und Dichtigkeit des Betongefüges (XC1 bis XC4)
- Korrosion, verursacht durch Chloride (XD1 bis XD3)
- Frostangriff mit und ohne Taumittel (XF1 bis XF4)
- Chemischer Angriff (XA1 bis XA3)
- Verschleißbeanspruchung (XM1 bis XM3).

Frischbeton bzw. Beton während der Erhärtung werden ebenfalls in Abstimmung lt. ÖNORM B 4710-1 klassifiziert. Die Einteilung erfolgt dabei unter Berücksichtigung der vorhandenen Konsistenzklasse sowie des auftretenden Größtkorns, der in Klassen unterteilten Gesteinskörnungen. Der Nennwert des Größtkorns der größten Fraktion im Beton ist dabei maßgebend. Die Konsistenzklassen in Österreich sind F2 (plastisch), F3 (weich), F4 (sehr weich) und F5 (fließfähig).

Als Anforderungen für besondere Betonanwendungen sieht die ÖNORM B4710-1 folgende Klassen vor:

- Unterwasserbeton (UB1, UB2)
- Pumpbeton (PB)
- Sichtbeton (SB)
- Selbstverdichtender Beton (SCC)
- Beton mit geringer Blutneigung (BL)
- Klassen bezogen auf die Wärmeentwicklung bei Erhärtung (W40...geringe Wärmeentwicklung, W45...mäßige Wärmeentwicklung, W55...durchschnittliche Wärmeentwicklung)
- Beton mit verlängerter Verarbeitungszeit (VV)
- Beton mit verzögerter Anfangserhärtung (VA)
- Klassen bezogen auf die Festigkeitsentwicklung (ES...schnell, EM...mittel, EL...langsam, E0...sehr langsam)
- Beton mit reduziertem Schwinden (RS) oder stark reduziertem Schwinden (RRS).

Die korrekte Bezeichnung würde nun, beispielhaft, lauten:

C25/30/XC3/XD2/SB (A) mit C25/30 als Bezeichnung der Druckfestigkeit
(wobei 25...charakteristische Zylinderdruckfestigkeit \geq
25 N/mm²; 30...charakteristische Würfeldruckfestigkeit \geq
25 N/mm²)
XC3/XD2 als Bezeichnung der Expositionsklassen
SB als Bezeichnung der Anforderungen für besondere
Betonanwendungen

A steht für Austria und ermöglicht die Zuordenbarkeit der Kurzbezeichnungen zu der ÖNORM B 4710-1.

2.1.7 Faserbeton

Fasern ermöglichen bei der Zugabe als Betonkomponente eine höhere Beanspruchbarkeit im Bereich der Zug-, und Biegezugfestigkeit sowie der Verformbarkeit. Als Betonzusatz können daher Glas-, Aramid-Glas-, Stahl- Kunststoff- (Polypropylen) und Carbonfasern beigemischt werden. Polypropylen-Fasern kommen dabei zur Anwendung, um eine Verbesserung des Abplatzverhaltens zu erreichen. Ihnen kommt im Brandschutz eine große Bedeutung zu und sie finden auch in den Betonrezepturen RK01 und RK01* dieser Arbeit Verwendung. PP-Fasern führen innerhalb der ersten 10 Stunden der Betonaushärtung zu einer geringen Erhöhung der Druckfestigkeit, haben aber keinen Einfluss auf den E-Modul. Im Bereich des Brandverhaltens werden insbesondere bei Kombination von Stahl- und PP-Fasern deutliche Verringerungen der Betonabplatzungen erreicht (*Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik*, S.45/[41]). Stahlfasern allein verbessern das Abplatzverhalten hingegen nicht.

Zahlreiche Publikationen am Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität behandeln das Brandverhalten von Normal- und Hochleistungsbetonen. Neben der Behandlung theoretischen Grundlagen kommt es in diesen Veröffentlichungen auch zur Diskussion verschiedenster Versuchsergebnisse hinsichtlich der Wirksamkeit von Fasern sowie der Einflüsse unterschiedlicher Betonrezepturen und Brandkurven (*Schneider, Horvath*, [6]; *Horvath, Schneider, Diedrichs*, [7]).

2.1.8 Grenzsieblinien

Die Grenzsieblinien basieren auf der *Fuller-Parabel*, welche als einfachste Idealsieblinie definiert ist. Diese ergibt sich nach folgender Beziehung:

$$A = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad \text{mit: } A \dots \text{Anteil einer Korngruppe } 0/d \text{ [\%]; } D \dots \text{GK; } d \dots \text{Durchmesser}$$

n bezeichnet dabei den Exponenten und führt bei der Wahl von $n = 0,5$ zur Ausbildung der Fullerparabel. Die praktisch verwendeten Werte bewegen sich bei $n = 0,25$ bis $0,70$ (Schneider, S.33/[12]).

ÖNORM B 4710-1 enthält die so genannte „Grenzsieblinie“, welche eine Einteilung der, als Betonzuschlag verwendeten, Korngemische ermöglicht. Unterteilt in die Korngemische für Größtkorn 4, 8, 11, 16 (Abbildung 2-5), 22 und 32 mm sind die jeweiligen Regelsieblinien A, B und C angegeben. Anzustreben ist dabei eine Lage nahe der Regelsieblinie B, während der Bereich zwischen A und B als „günstig“ und der Bereich zwischen B und C als „brauchbar“ bezeichnet wird. Oberhalb der Regelsieblinie C ist der gewählte Zuschlag zu sandreich, kann aber bei Lage innerhalb des erweiterten Sieblinienbereiches noch als geeignet betrachtet werden.

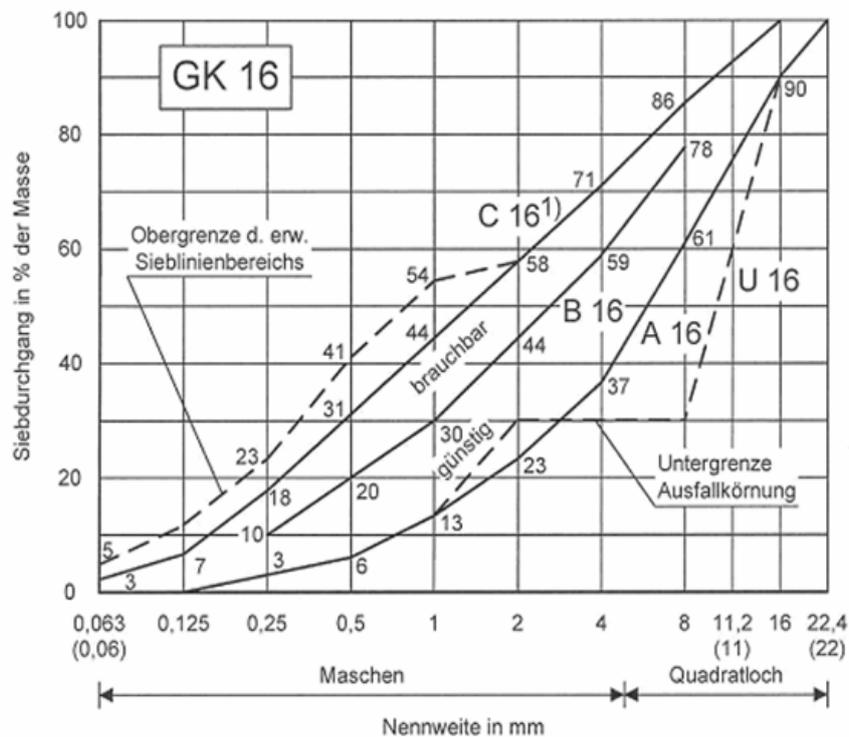


Abbildung 2-5: Grenzsieblinie GK 16 (ÖNORM B 4710-1, S.35/[26])

2.2 Betonverhalten bei Brand

Betonbauteile unter Brandbelastung bergen das Risiko eines Tragwerkstotalversagens erst in einem späten Stadium des Brandverlaufes. Betonbauteile erhöhen die Brandlast nicht und lassen sich auch nach langer Feuereinwirkung sanieren, weiters kommt es zu keiner Bildung toxischer Gase (*Schneider*, S.150/[10]).

2.2.1 Nichtbrennbarkeit von Beton

Sowohl die Geometrie als auch die Form von Betonbauteilen bleiben unter Feuereinwirkung im Wesentlichen erhalten, weshalb man Beton zu der Gruppe der Brennbarkeitsklasse A1 zählt (ÖNORM EN 13501-1, [27]).

Die Prüfung der Nichtbrennbarkeit hat u. a. gemäß ÖNORM EN ISO 1182 zu erfolgen.

2.2.2 Betonabplatzungen

Abplatzungen im Sinne dieser Arbeit sind Betonabsprengungen infolge einer Brandbeanspruchung.

Der Versagensmechanismus in Betonbauteilen entsteht erst dann, wenn die Randzonen der Bauteile ausreichend durchwärmt werden bzw. das Betongefüge durch die Brandbelastung ausreichend stark zermürbt ist.

Beton ist zusätzlich ein schlechter Wärmeleiter, der im Brandfall starke Erwärmungen entlang der Randzonen erfährt, während die Kernbereiche weit weniger starke Temperaturerhöhungen aufweisen. Während hoher Temperaturbelastungen entstehen im Inneren Entwässerungs- und Verdampfungsprozesse, welche bei bestimmten Betonrezepturen zu explosionsartigen Abplatzungen führen. Neueste Branduntersuchungen haben weiters gezeigt, dass auch dem Beton beigemischte PP-Fasern nicht immer entlastend auf den entstehenden Dampfdruck wirken.

Die Menge der Abplatzungen ist dabei abhängig von (*Horvath, Schneider, Diedrichs*, S.31/[7]):

- Aufheizungsgeschwindigkeit
- Porendruck
- Betontemperatur
- Zement
- Betonfeuchte
- Bewehrungsanordnung
- Betonfestigkeit
- Bauteilgeometrie
- Porengröße
- Verformungsbehinderung.

Weiters muss beachtet werden, dass Betonmischungen mit einem Ausbreitmaß > F52 empfindlich auf die Zugabe von Fasern reagieren und dass bei einem erhöhten Wasseranspruch, ein erhöhter Luftgehalt und veränderte rheologische Eigenschaften die Folge sein können. Ausgleichend dazu wirkt ein erhöhter Mehlkornanteil sowie entsprechende Bindemittel inklusive dazu abgestimmter Zusatzmittel wie z.B. Hochleistungsverflüssiger, Luftporenmittel und Stabilisierer (*Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik*, S.12/[3]).

In der Literatur wird der Abplatzungsprozess in die Gruppen Zuschlagstoff-Abplatzung, Abfallen von Betonschichten (Soft Spalling bei Spritzbeton) und Explosionsartige Abplatzungen (Explosive Spalling) unterteilt.

Abbildung 2-6 zeigt die Arten, Ursachen und Wirkungen von Abplatzungen bei normalfesten Betonen.

Art	Ursache	Wirkung
Abplatzungen einzelner Gesteinskörner	physikalische oder chemische Veränderungen infolge hoher Temperaturen, z. B. Quarzinversion	Zerplatzen oder Zersplittern einzelner Gesteinskörner auf der Betonoberfläche in Form von Pop-outs
explosionsartige Abplatzungen	plötzliche Betonabspaltungen innerhalb der ersten 30 min. des Brands infolge Ausströmen von Wasserdampf und Temperatur-Eigen- und Zwangspannungen	durch Überschreiten von Zugspannungen und durch Scherkräfte entstehen Rissflächen im Betongefüge, so dass oberflächlich schlagartig Betonstücke abfallen. Diese zerstörenden Abplatzungen reichen bis tief in den Betonquerschnitt, legen die Bewehrung frei und führen zu Löchern in dünnen Bauteilen.
Abfallen von Betonschichten	Eigenspannungen aufgrund unterschiedlicher Dehnungen im Betonquerschnitt und zwischen Beton und Bewehrung führen zum Ablösen größerer Betonschichten nach längerer Brandbeanspruchung, z. B. nach 90 min.	großflächiges Freilegen von Bewehrungsanteilen und Verminderung von Querschnittsflächen, besonders in Druckbereichen der Bauteile. Diese zerstörenden Abplatzungen verursachen ein relativ frühes Versagen des Bauteils.

Abbildung 2-6: Arten, Ursachen und Wirkungen von Abplatzungen bei normalfesten Betonen [32]

Unter **Zuschlagstoff Abplatzungen (Aggregate Spalling)** wird das Zerplatzen oder Zersplittern von Zuschlägen infolge physikalischer und chemischer Veränderungen unter hohen Temperaturen verstanden (*Kordina, Meyer-Ottens*, S.82 [33]). 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, wodurch es zu einer Zermürbung der Zuschläge und damit des Betons kommt.

Unter **Abfallen von Betonschichten (Sloughing off)** wird das Abfallen von kleineren oder größeren Betonschichten oder -teilen nach längerer Brandbeanspruchung verstanden. Die Zermürbung und Rissbildung infolge Brandbeanspruchung ist dabei der Haupteinfluss und tritt besonders bei zunehmenden Verformungen auf. Ursachen für das Abfallen von Betonschichten sind Eigenspannungen infolge unterschiedlicher Dehnungen bei ungleichmäßiger Temperaturverteilung über einen Querschnitt, Bauteilverformungen, Zwängungsspannungen und Zermürbung des Betons.

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. Die Permeabilität beschreibt die allgemeine Durchlässigkeit von Gesteinen [40]. Der Wasserdampf diffundiert durch die Zone mit geringerer Permeabilität hindurch und staut sich 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.

Explosionsartige Abplatzungen (Explosive Spalling) sind die häufigste und gefährlichste Form von Abplatzungen. Als Hauptursache dafür können Zugspannungen, die durch die Bildung von Dampfdrücken entstehen angesehen werden. 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/mm² entstehen, die sich bei einer weiteren Steigerung der Temperatur auf 350°C verdoppeln können, wobei die Zugfestigkeit des Betons bei weitem überschritten werden kann (*Höfer*, S.65/[17]).

Abbildung 2-7 beschreibt den Vorgang während explosionsartiger Abplatzungen nach [7]:

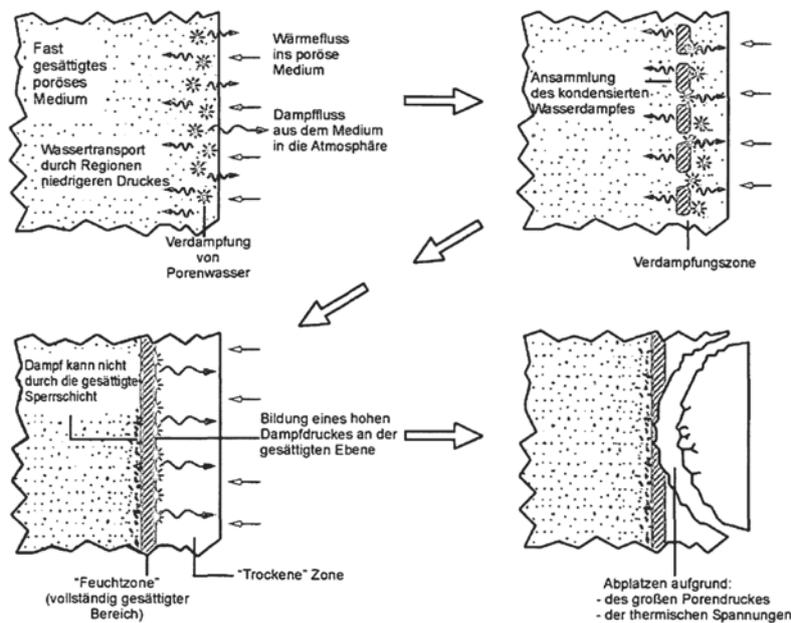


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Entstehung von Abplatzungen (Schneider; Horvath, Dehn, S.284/[5])

Der Vorgang des explosionsartigen Versagens von Betonen unter Brandeinwirkung beginnt mit der Desorption des physikalisch gebundenen Wassers gefolgt von dem in den Gelporen gebundenen Wasser sowie Kristallwasser aus den Zuschlägen. Ein Teil des verdampfenden Wassers entweicht durch die Poren, während der andere Teil des Wasserdampfes in den Betonkörper hineinströmt, dadurch in kältere Zonen gelangt und durch Kondensation wieder Wasser bildet. Nach Erreichen der Porensättigung kommt es durch den weiter auftretenden Dampfdruck bei Überschreitung der Betonzugfestigkeit zu schalenförmigen explosionsartigen Abplatzungen des Betons.

Die **Wirkung von PP-Fasern** verhindert diese Abplatzungen dadurch, dass diese im Brandfall bei 160 bis 165° C schmelzen, sich als unbedenklich eingestufte CO₂-Gase verflüchtigen und ein Kapillarenetz unterschiedlichen Durchmessers im Beton bilden. Dadurch kann der beim Brand im Beton durch Dekompression entstehende Wasserdampf entweichen, ohne Abplatzungen zu verursachen (Horvath, Schneider, Diedrichs, [7]).

Eine Abhängigkeit der Temperatureindringgeschwindigkeit vom Fasergehalt ist in Normalbetonprobekörpern nicht gegeben (Wille, Dehn, Kützing, S.218/[41]; Schneider, Horvath, S.133/[44]).

2.2.3 Typische Betoneigenschaften unter Brandbelastung

Die Betrachtung der typischen Betoneigenschaften unter Brandbelastung umfasst die Untersuchung der Temperaturverläufe, der Festigkeit, des E-Moduls und des Dehnungsverhaltens. Die Zugfestigkeit von Beton unter hohen Temperaturen ist hingegen von nur untergeordneter Bedeutung.

Unter hohen Temperaturen treten Mineralumwandlungen und Entwässerungsreaktionen im Beton auf. Bei Temperaturen von ungefähr 1200 °C beginnen die Betonkomponenten zu schmelzen und es kommt zum Austritt von zuvor eingeschlossenen Gasen.

Folgende Aufzählung enthält wichtige Umwandlungs- bzw. Zersetzungsreaktionen (*Horvath*, S.35/[4]):

- 30 bis 120 °C Verdunstung bzw. Verdampfung von freiem und physikalisch gebundenem Wasser
- 100 bis 300 °C Gelabbau, Dehydratationsbeginn
- 250 bis 600 °C Abgabe des chemisch gebundenen Wassers
- 573 °C Nur bei Quarz: Quarzumwandlung
- 600 bis 700 °C Beginn der Zersetzung der CSH-Phasen
- 600 bis 900 °C Nur bei Kalkstein: Entsäuerung $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- 1200 bis 1300 °C Beginn des Schmelzens von Zementstein
- ≥ 1400 °C Zementstein liegt als Schmelze vor.

2.2.3.1 Temperaturverteilung bei einseitig beanspruchten Betonwänden

Die umfassende Kenntnis der Temperaturverläufe in Betonbauteilen ist in erster Linie für die Bauteileinstufung in Feuerwiderstandsklassen und die Kenntnis des Versagenszeitpunktes von Bedeutung. Durch die bekannten Temperaturbereiche lässt sich weiters die Temperaturbelastung für die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen feststellen.

Die Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9 zeigen die Mindestbauteildicken, zur Gewährleistung der Maximaltemperaturen unter Brand gemäß der einschlägigen Normen und dienen der Einteilung von Betonbauteilen in Feuerwiderstandsklassen.

Bei einer Temperaturbeanspruchung nach DIN 4102-2 ergeben sich für einseitig beflammete Betonwände bzw. -platten folgende Temperaturverteilungen (Kordina, S.67/[33]):

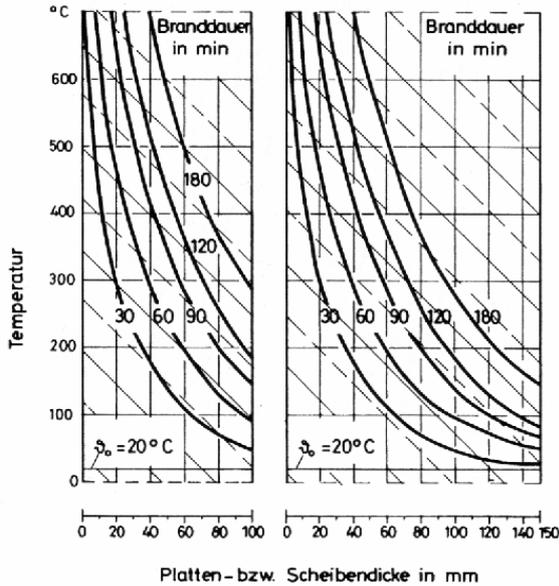


Abbildung 2-8: Temperaturverteilung in einseitig nach DIN (ETK) beanspruchten Platten aus Normalbeton (Kordina, S.67/[33])

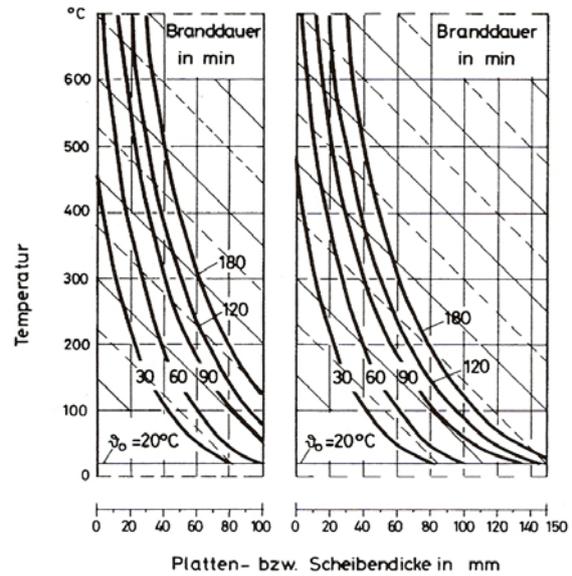


Abbildung 2-9: Temperaturverteilung in einseitig nach DIN (ETK) beanspruchten Platten aus Leichtbeton (Kordina, S.67/[33])

2.2.3.2 Temperaturverteilung in feuchtem Faserbeton

Abbildung 2-10 zeigt empirisch ermittelte Temperatureindringkurven, gültig für feuchten Faserbeton mit einer Trockenrohddichte $\rho = 2000$ bis 2600 kg/m^3 . Dabei berücksichtigt wurden die Temperatureinwirkungen gemäß RWS (Rijkswaterstaat-Temperatur-Zeit-Kurve-Holland), HC_{inc} (erhöhte Hydrocarbonkurve gemäß ÖNORM EN 1991-1-2), HC (Hydrocarbonkurve gemäß ÖNORM EN 1991-1-2) und ETK (Einheitstemperaturkurve gemäß EN 1363-1) ab.

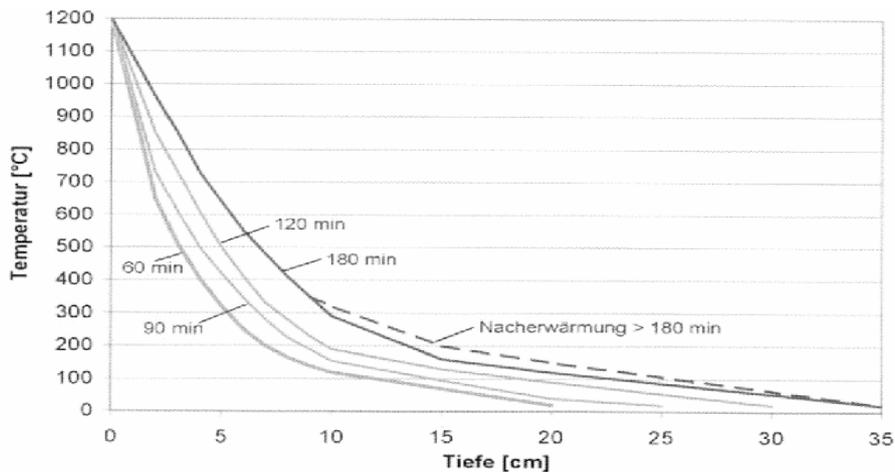


Abbildung 2-10: Temperatureindringkurven für feuchten Faserbeton (Kusterle, [19]; VÖZ [20])

2.2.3.3 σ - ϵ -Diagramme bei hohen Temperaturen

In der Fachliteratur sind Spannungs-Dehnungsdiagramme von Normalbetonprobezylindern, bei hohen Temperaturen, ohne Vorlast bzw. mit Vorlast vorhanden. In dieser Arbeit sind nur Diagramme des Lastfalls ohne Vorlast angeführt (Abbildung 2-11), da sämtliche Versuche während dieser Diplomarbeit ebenfalls ohne Vorbelastung durchgeführt wurden.

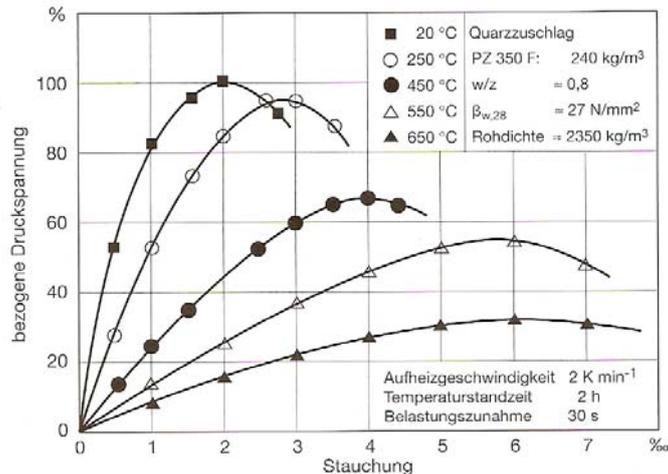


Abbildung 2-11: Spannungs-Dehnungsdiagramm von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei hohen Temperaturen (Schneider, Horvath, S.72/[6])

Zulässige Schlussfolgerungen bezüglich der Hochtemperaturfestigkeit von Normalbeton sind:

- Signifikanter Einfluss von Temperaturen > 600 °C
- Starker Rückgang des E-Moduls
- Die Bruchdehnung nimmt zu
- Der Beton wird duktiler.

Zu beachten ist jedoch, dass im Temperaturbereich von ~ 100 °C gelegentliche Betondruckfestigkeitszunahmen festgestellt wurden (Schneider, Diedrichs, Weiß, [16]). Bei entsprechender Auswahl der Betonkomponenten sowie sorgfältiger Herstellung und Nachbehandlung kann Beton auch erhöhte Temperaturen bis etwa 250 °C ohne wesentliche Beeinträchtigung auch auf Dauer ertragen (Kordina, Meyer-Ottens, S.52/[20]).

Untersuchungen haben ergeben, dass Bauteile in Abhängigkeit der Belastung nach der Abkühlung eine geringere Tragfähigkeit aufweisen können als im Heißzustand (Schneider, Horvath, S.120/[6]).

2.2.3.4 E-Modul und Dehnungsverhalten

Der Elastizitätsmodul ist eine Stoffkonstante und ergibt sich durch den Quotienten aus der Spannung σ und der Dehnung ε .

Mit steigender Temperatur nimmt der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Zementart, dem W/B-Wert, der Porosität und dem Betonalter ab. Schon bei kleinen Temperaturerhöhungen lässt sich ein Rückgang der Elastizität feststellen. Der Einfluss von Druckspannungen auf den E-Modul ist in Abbildung 2-12 dargestellt. Druckbeanspruchte Betonbauteile behalten demnach bei einer Erwärmung länger ihre Steifigkeit als Unbelastete. Die aufgebrachten Druckspannungen wirken den temperaturbedingten Rissbildungen entgegen, was sich günstig auf das Temperaturverhalten des Materials und damit auch auf Betonbauteile auswirkt.

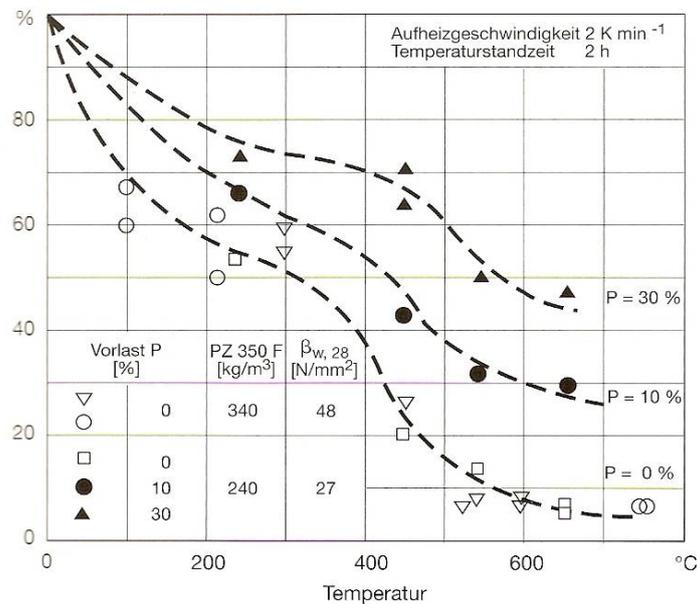


Abbildung 2-12: Bezogener Hochtemperatur-E-Modul bei verschiedenen Vorlasten (Schneider, Horvath, S.66/[6])

Das Dehnungsverhalten ist auf Grund der dadurch auftretenden Zwangs- und Eigenspannungen, eventueller Verformungen und/oder ungewollter Verschiebungen von großer Bedeutung. Massiven Einfluss auf die temperaturbedingten Dehnungen hat dabei die Wahl des verwendeten Zuschlages, wobei die Betone erst in dem Bereich ab ca. 100 °C große Dehnungsunterschiede aufweisen. Das Ausdehnungsverhalten von Baustahl und Betonen mit Sandsteinzuschlägen ist bis etwa 500 °C gleich. Dies wirkt sich günstig auf das Verbundverhalten von Stahlbetonkonstruktionen im Brandfall aus (Schneider, S.154/[10]).

2.2.4 Berechnung der Temperaturverteilungen in Stahlbetonbauteilen

Bevor näher auf die Berechnung instationärer Wärmeleitungsprozesse eingegangen werden kann ist es unerlässlich die Grundlagen der Wärmeübertragung zu beschreiben.

Der Begriff Wärme ist als der Inhalt an kinetischer Energie der Moleküle eines Stoffes definiert und ist unmittelbar mit der Temperatur verbunden. Das bedeutet, dass Körper, die einander berühren und unterschiedliche Temperaturen aufweisen, zu einer gemeinsamen Ausgleichstemperatur streben, wobei die Wärmeströme von Bereichen höherer zu Bereichen niedriger Temperaturen fließen.

Die Arten der Wärmeübertragung sind (*Schneider*, S.44/[11]):

- Konvektion: Dies ist die Mitführung von Wärme durch die Teilchen in Gasen und Flüssigkeiten
- Wärmestrahlung: Übertragung von Wärme durch Strahlung, ausgehend von den Oberflächen fester Körper (nicht stoffgebunden)
- Wärmeleitung: Unmittelbarer Wärmeaustausch benachbarter Teilchen in festen, flüssigen und gasförmigen Körpern.

Stationäre Wärmeleitungsbetrachtungen setzen konstante Temperaturen auf beiden Seiten eines Baustoffes voraus.

Instationäre Wärmeleitungsberechnungen können hingegen veränderliche Temperatureinwirkungen, wie z.B. auch Brandkurven, berücksichtigen.

Als Eingangswerte in solche Berechnungen ist die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit λ und der spezifischen Wärmekapazität c des betrachteten Stoffes von Wichtigkeit.

Das Produkt der Stoffwärme c und der Rohdichte ergibt die Wärmespeicherfähigkeit Q' eines Baustoffes.

Die Ausbreitgeschwindigkeit eines Temperaturfeldes innerhalb eines Körpers hängt von der Temperaturleitfähigkeit a ab und errechnet sich aus dem Quotienten aus der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmespeicherfähigkeit $c \cdot \rho$.

Neben der Kenntnis des Hochtemperaturverhaltens von Beton ist die Beschreibung der auftretenden Temperaturen in Stahlbetonbauteilen eine weitere Voraussetzung zur umfassenden Beschreibung des Betonbauteilverhaltens unter Brandeinwirkung.

Die mathematische Formulierung dieser Vorgänge gelingt dabei durch Behandlung des instationären Wärmeleitproblems und wurde erstmals von *J. B. Fourier*, mittels einer partiellen Differentialgleichung beschrieben:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\delta T}{\delta t} = \operatorname{div}(\lambda) \cdot [\operatorname{grad}(T)] + W$$

mit: c...Wärmekapazität

t...Zeit

ρ ...Dichte

λ ...Wärmeleitfähigkeit

T...Temperatur

W...Wärmequelle oder -senke

Da sowohl die Dehydration des Betons bei hohen Temperaturen als auch die Verdampfung des Kapillarwassers mit Energieänderungen verknüpft sind treten Wärmequellen und Wärmesenken in der Praxis also tatsächlich auf und beeinflussen dabei merklich die Temperaturfelder. Die Berücksichtigung dieser Effekte wird dabei durch eine Vereinfachung der numerischen Behandlung der Gleichung erzielt, indem $W = 0$ gesetzt wird. Somit ergibt sich für ein ebenes Temperaturfeld mit den Koordinaten x und y:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) + \frac{1}{\rho \cdot c} \cdot \frac{d\lambda}{dT} \left[\left(\frac{\delta T}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\delta y} \right)^2 \right]$$

Dies setzt die Kenntnis der Temperaturleitfähigkeit $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ und der Wärmeleitfähigkeit λ

des verwendeten Betons voraus. Als Hinweis für die praktische Berechnung sei hierbei erwähnt, dass der zweite Term obiger Gleichung im Gegensatz zum ersten Term verschwindend klein ist und daher vernachlässigt werden kann. Die Verdampfung des physikalisch gebundenen Wassers zwischen 100 und 140 °C wird durch Modifikation des c-Wertes berücksichtigt (*Schneider, Lebeda, [1]*).

Temperaturmessungen in brandbeanspruchten Stahlbetonbauteilen haben weiters gezeigt, dass die Temperatur im „ungestörten“ Beton nahezu gleich jener Temperatur ist, wie sie in der Achse eines im Beton eingebetteten Stahles auftritt, was wiederum bedeutet, dass die durch eingelegte Bewehrungsseisen verursachte Störungen des Temperaturfeldes brandschutztechnisch vernachlässigbar sind (*Schneider, S.165f/[10]*).

2.3 Brandkurven

2.3.1 Einheitstemperaturkurve ETK

Den Brandversuchen wird in vielen Fällen die Einheitstemperaturkurve (ETK) entsprechend ISO 834-1 (Feuerwiderstandsprüfungen – Bauteile – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Ausgabe 9/99) zu Grunde gelegt. Diese stellt die Grundlage des Eurocodes der ÖNORM EN 1363, der ÖNORM EN 13501, der DIN EN 1365 und der *DTU (Document technique unifié)* dar (*Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik*, S.12/[30]).

Die ETK wurde um 1920 aus den Erfahrungen von Raumbränden für Hoch- und Gewerbebauten entwickelt und basiert auf einem Feststoffbrand ohne Entzündungs- und Schwelbrandphase.

Die ETK gilt als „offene Brandkurve“, da keine rückläufigen Temperaturen (Abkühlphasen) definiert sind. Als maximale Dauer der Feuerwiderstandsprüfung R-Tragfähigkeit ist in der ÖNORM EN 13501 eine Zeitdauer von 360 min angeführt.

Die Gleichung der ETK lautet: $T = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) + 20$

mit: T...mittlere Ofentemperatur [°C]

t...Zeitdauer [min]

Umgebungstemperatur 20 °C

Die zulässigen Abweichungen sind in der EN 1363-1 folgendermaßen geregelt (Abbildung 2-13):

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

Dabei ist: $d_e = \frac{A - A_s}{A} \cdot 100 \%$ mit A, A_s als jeweilige Fläche unter tatsächlichen

mittleren Ofen-Temperaturzeitkurve bzw. ETK und d_e, die prozentuale Abweichung.

Bei der Ermittlung dieser Flächen ist jeweils vom Zeitpunkt Null auszugehen und eine Summierung der Flächen in Zeitabständen von nicht mehr als 1 min durchzuführen. Weiters darf nach den ersten 10 min kein Thermoelement eine Temperaturüberschreitung der ETK um mehr als 100 °C aufzeichnen.

Die Toleranzen im Bereich $t \leq 5$ min sind nicht per Norm geregelt, ein Anstreben der rechnerisch ermittelten ETK-Solltemperaturen wird jedoch vorausgesetzt.

Um den teilweise schwer einregelbaren, steil ansteigenden Temperaturanstieg während der ersten fünf Minuten zu begegnen, wird, statt der Verwendung von Plattenthermometern, die zusätzliche Anordnung herkömmlicher Edelstahl-Mantelthermoelemente empfohlen.

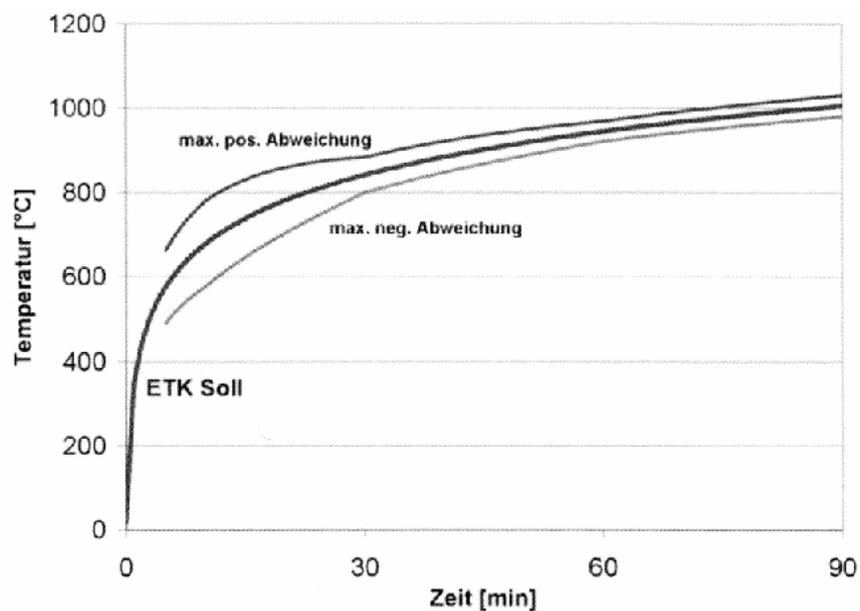


Abbildung 2-13: Einheitstemperaturkurve gemäß ÖNORM EN 1363-1

2.4 Feuerwiderstandsprüfungen gemäß ÖNORM

In Österreich ist bei der Durchführung von Feuerwiderstandsprüfungen nach ÖNORM EN 1363-1 vorzugehen. Diese Europäische Norm hat den Status einer Österreichischen Norm. Teil 1 dieser Norm behandelt „allgemeine Anforderungen“, Teil 2 beschreibt „alternative und ergänzende Verfahren“ betreffend die Feuerwiderstandsprüfungen, Teil 3 enthält Angaben zum „Nachweis der Ofenleistung“.

Ziel dieser Norm ist es das Verhalten eines Probekörpers, der definierten Beflammungs- und Druckbedingungen ausgesetzt ist, zu beurteilen.

Im Weiteren werden nun die, für die gegenständliche Arbeit, relevanten Punkte der ÖNORM EN 1363 behandelt.

Prüföfen müssen so konstruiert sein, dass sie mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen betrieben werden können und eine einseitige Beflammung von vertikal oder horizontal raumabschließenden Bauteilen ermöglichen muss. Die Auskleidung muss aus Werkstoffen mit einer Dichte von weniger als 1000 kg/m^3 bestehen und eine Mindestdicke der Auskleidung von 50 mm aufweisen.

Bezüglich der Innenthermoelemente haben diese Messeinrichtungen Kennwerte aufzuweisen, welche für die Baustoffart geeignet sind bzw. dem zu messenden Temperaturbereich angemessen sein und dürfen das Probekörperverhalten nicht beeinträchtigen.

Außerdem sind Ofen-Thermoelemente und Thermoelemente auf der unbeflammten Oberfläche anzubringen.

Die Genauigkeit der Temperaturmesseinrichtungen ist für die Prüföfen $\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$, für die Umgebung und unbeflammte Seite $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ und für sonstige Temperaturmessungen $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Als Aufheizkurve ist die Einheitstemperaturkurve maßgebend (Abschnitt 2.3.1).

Die Umgebungstemperatur bezieht sich in ÖNORM EN 1363 zwar auf Laborversuche (d.h. Lufttemperatur = $20 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), konnte jedoch auch während der Freiluftversuche nahezu

eingehalten werden (Anm.: die minimale Lufttemperatur während der Brandversuche war 8,3 °C).

Zum Zeitpunkt der Prüfung müssen die Festigkeit und der Feuchtegehalt annähernd dem Zustand entsprechen, bei der sich der Probekörper nach einer Lagerung in Umgebungsluft von 50 % relativer Feuchte bei einer Temperatur von 23 °C im Gleichgewichtszustand befindet.

Betonbauteile dürfen nur unter oben genannten Umständen, in einem Alter von mindestens 28 Tagen geprüft werden.

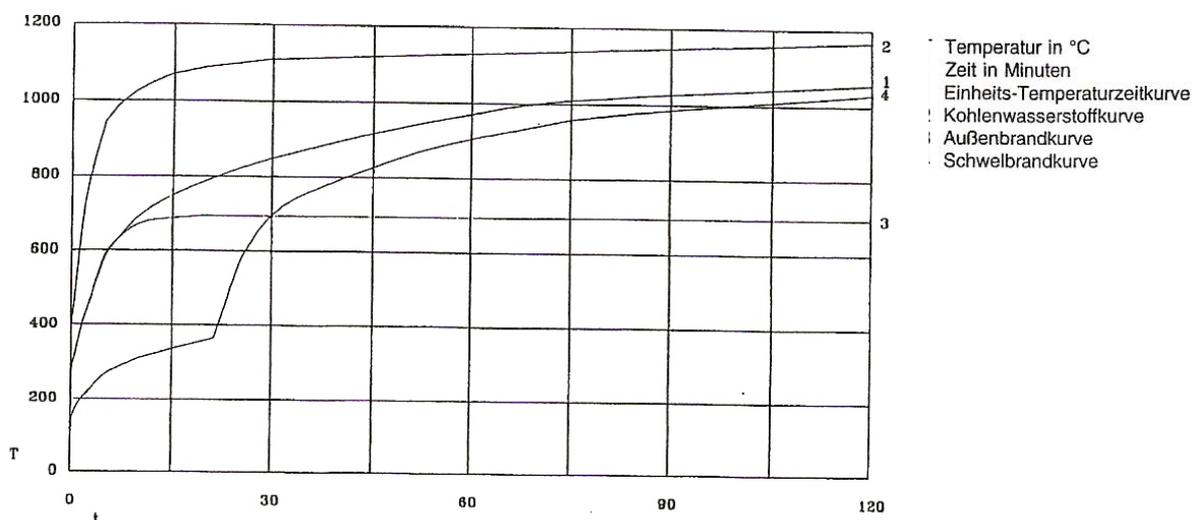
Während der Aufheizdauer sind die Temperaturen aller Thermoelemente zumindest minütlich zu messen und aufzuzeichnen.

Die Beendigung der Prüfung kann durch das Erreichen ausgewählter Kriterien, d.h. z.B. durch Erreichen der festgesetzten Brandversuchsdauer, eintreten.

Anhang F der ÖNORM EN 1363-1 enthält empfohlene Feuchtegehaltsbereiche (bezogen auf das jeweilige Trockengewicht), um das Risiko ungewollter Abplatzungen und die Bildung dampfgefüllter Hohlräume zu minimieren. Für Beton wird darin ein Wert von 1 bis 5 % angegeben.

Wie schon eingangs erwähnt umfasst ÖNORM EN 1363 Teil 2 alternative bzw. ergänzende Verfahren und enthält neben der Schwelbrand- und der Außenbrandkurve die Gültigkeit der Kohlenwasserstoffkurve während der Brandversuche (s. Abbildung 2-14).

Abbildung 2-14: Temperaturzeitkurven gemäß ÖNORM EN 1363-2



3 Vorversuche und Versuchsplanung

Die Vorversuche sollten zunächst dazu dienen sämtliche Arbeitsvorgänge kennen zu lernen, diese zu automatisieren und so einheitliche, in den zulässigen Bandbreiten der entsprechenden Normen liegende Ergebnisse zu erhalten. Weiters wurde im Zuge der Vorversuche die passenden Betonrezepturen für die Mischungen RK01 (Anm.: diese Mischung sollte während der Brandversuche kaum oder nicht abplatzen) und RK02 (Anm.: diese Mischung sollte während der Brandversuche Abplatzungen liefern) erstellt.

Weiters erwies es sich als zweckmäßig eine durchgehende Nummerierung bzw. Benennung aller herzustellenden Probekörper zu wählen, welche einerseits der Identifikation und andererseits der übersichtlicheren Handhabung während der Protokollierungsarbeiten der zahlreichen Messergebnisse der Probekörper diene.

Folgende Benennung der Probekörper wurde gewählt:

- Probekörper: KM-VV12-1 RK01 ... [**Kosch bzw. Matzinger**]-[**Vorversuch**, .. cm Platte]-[**Serie**] [**Mischung**]
- Probewürfel: KM-VVPW1 RK01 ... [**Kosch bzw. Matzinger**]-[**Vorversuchsprüfwürfel**, **laufende Nummer**] [**Mischung**].

Der Versuchsablauf sollte, getrennt nach Vor- und Hauptversuch, folgendermaßen ablaufen:

	Vorversuche	Hauptversuche
• Probekörperherstellung	Tag 0	Tag 0
• Nachbehandlung (Wasserbad)	Tag 1 bis 7	Tag 1 bis 7
• Lagerung bei Raumtemperatur	ab Tag 7	ab Tag 7
• Druckversuche	Tag 7	Tag 28
• Brandversuche	~ Tag 14	Tag 28
• Restfestigkeitsuntersuchung an Würfeln 15x15x15 cm ³ .	nach Brandv.	nach Brandv.

Die Tabellen 11-1 und 11-2 in Anhang zeigen alle Versuchskörper inklusive wichtiger Messdaten.

3.1 Versuchsplanung

Wie eingangs beschrieben, waren nun folgende Probekörper, sowohl Vorversuche als auch Hauptversuche betreffend, zu erstellen (Tabelle 3-1):

Tabelle 3-1: Prüfkörperauflistung

Probekörper	Prüfkörperabmessungen		
	Prüfkörperlänge	Prüfkörperbreite	Prüfkörperhöhe
KM-VV12-1 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-VV12-2 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-VV12-3 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-VVPW[1 bis 4] RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	15 cm	15 cm	15 cm
KM-HV8-1 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	8 cm
KM-HV8-2 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	8 cm
KM-HV8-3 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	8 cm
KM-HV12-1 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-HV12-2 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-HV12-3 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-HV16-1 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	16 cm
KM-HV16-2 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	16 cm
KM-HV16-3 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	16 cm
KM-HV20-1 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	20 cm
KM-HV20-2 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	20 cm
KM-HV20-3 RK01(1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	60 cm	50 cm	20 cm
KM-HV12-1 RK02(ohne PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-HV12-2 RK02(ohne PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-HV12-3 RK02(ohne PP-Fasern)	60 cm	50 cm	12 cm
KM-HVPW[1 bis 26] RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	15 cm	15 cm	15 cm
KM-HVPW[28 bis 32] RK02 (ohne PP-Fasern)	15 cm	15 cm	15 cm

3.2 Betonmischungen

Ausgangspunkt für die Wahl der Betonrezeptur waren die Ergebnisse einer am Institut laufenden Diplomarbeit. Unter Berücksichtigung der Sieblinien der zur Verfügung stehenden Zuschlagstoffe entstand eine erste Betonrezeptur. Im Zuge der ersten Vorversuchsbetonmischung stellte sich jedoch heraus, dass der angesetzte Fließmittelanteil von 1,5 % (im Verhältnis zum Bindemittelanteil) zu hoch gewählt war, da das Ausbreitmaß 76 cm betrug. Für die Hauptversuche wurde daraufhin ein Fließmittelanteil von 0,75 % (ebenfalls im Verhältnis zum Bindemittelanteil) gewählt.

3.2.1 Betonausgangsstoffe

- Zuschlagstoffe, Abbildung 3-1 (bezogen von der Firma *Kiesunion*)



Abbildung 3-1: Gesteinskörnungen für die Vorversuche

(Anmerkung: Die zugehörigen Sieblinien sind unter Pkt. 4.1.2 angeführt)

- Bindemittel - *Portlandhüttenzement EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42*, Abbildung 3-2
- Fasern - *Fibrin PP-Faser PM 6/15 K20X1 P 615.1* (Länge 6 mm, $d = 15\mu\text{m}$), Abbildung 3-2
- Fließmittel - *MAPEI Dynamon SX 14*, Abbildung 3-2.



Abbildung 3-2: Portlandhüttenzement; PP-Fasern; Fließmittel

3.2.2 Betonmischung RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Tabelle 3-2 und Abbildung 3-3 zeigen die Betonrezeptur bzw. die Sieblinie der Mischung RK01. Die Sieblinie liegt im günstigen Bereich AB.

Tabelle 3-2: Betonrezeptur RK01

Betonkomponente	RK01 (kaum Abplatzungen); Wasser/Bindemittel = 0,55		
	Menge [kg]	Menge [%]	Menge [kg] je Mischung
Zuschlagstoffe		78,35	
RK 0-4	975,0		50,26
RK 4-8	480,0		24,74
RK 8-16	445,0		22,94
Bindemittel		13,86	
Portlandhüttenzement	336,0		17,32
Fasern	1,50	0,06	0,077
Fließmittel	2,52	0,10	0,130
Wasser	185,0	7,63	9,54
Gesamt	2425,0 kg	100 %	125,000 kg

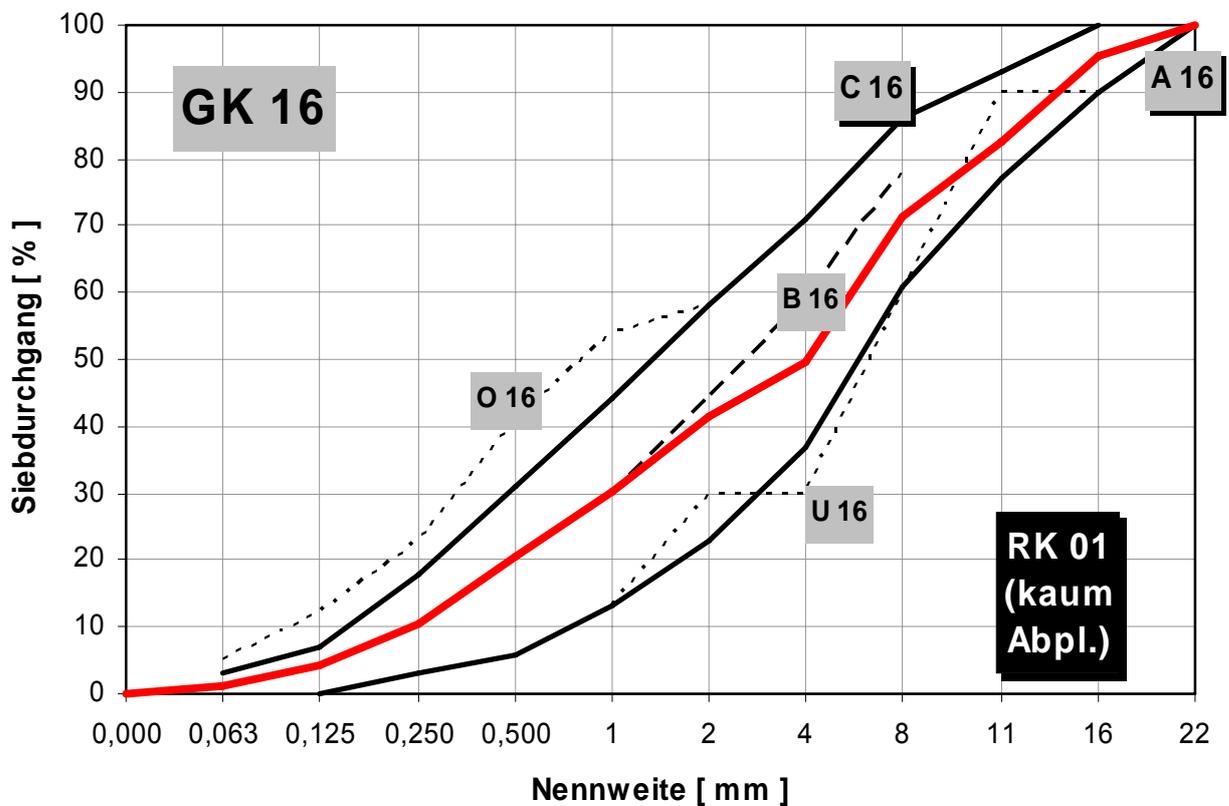


Abbildung 3-3: Sieblinie der Betonmischung RK01

3.3 Probekörperherstellung

Schon vor, und gerade auch während der Vorversuche wurden Überlegungen bezüglich der Reproduzierbarkeit der Mischvorgänge angestellt. Unter Bezugnahme auf eine, noch nicht veröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Hochbau und Technologie, kam es zu folgender Festlegung:

Die Einbringung der Betonkomponenten erfolgte zeitlich gestaffelt nach Zuschlägen (RK8-16, RK4-8, RK1-4, RK0-1), Bindemittel, Fasern, Wasser + Fließmittel. Das Mischen erfolgte in dem im Institut vorhandenen Spezialmischer (Wirbelmischer) der Fa. *Eirich* (s. Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Das voreingestellte Programm am *Eirich Intensivmischer* Typ R08W umfasste folgende Schritte:

- Einbringen der Zuschlagskörnungen, beginnend mit der größten Fraktion
- Zugabe der PP-Fasern und Trockenmischung
- Zugabe des Bindemittels, danach halbminütiges Trockenmischen
- Gleichzeitige Zugabe von Wasser und des darin gelösten Fließmittels
- 2,5 Minuten Nassmischung
- Entnahme des Frischbetons.



Abbildung 3-4: Wirbelmischer der Fa. *Eirich* (inkl. Steuerschrank)

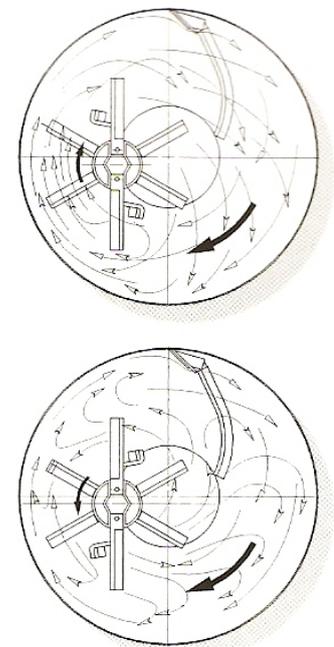


Abbildung 3-5: Strömungsbild
Eirich [35]

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Betonierabfolge sowie sämtliche Zugehörigkeiten der Probekörper zu den jeweiligen Mischungen:

- **Charge 1** – 20.11.2006; Ausbreitmaß: 76 cm; Luftporengehalt: 2,1 %
KM-VV12-1 RK01, KM-VVPW1, KM-VVPW2
- **Charge 2** – 20.11.2006; Ausbreitmaß: 75 cm; Luftporengehalt: 2,3 %
KM-VV12-1 RK01 (Forts.), KM-VV12-2, KM-HVPW3, KM-VVPW4
- **Charge 3** – 20.11.2006; Ausbreitmaß: 71 cm; Luftporengehalt: 2,3 %
KM-VV12-2 RK01 (Forts.), KM-VV12-3, KM-HVPW5, KM-VVPW6.

Die Probekörperherstellung erfolgte in Holzschalungen (Abbildung 3-7). Alle Probekörper waren mit Stahlbewehrungsmatten bewehrt. In Feldmitte der Probekörper wurden zusätzlich Thermoelemente einbetoniert (Abbildung 3-6), welche während der Brandversuche eine Erfassung der auftretenden Temperaturen im Betonkörperquerschnitt gewährleisten sollten.



Abbildung 3-6: Thermoelemente 12 cm



Abbildung 3-7: Holzschalungen

3.4 Betonprüfung lt. ÖNORM B 3303

Da sämtliche Probekörper aus Normalbeton gefertigt wurden, war die Betonprüfung ausnahmslos in Abstimmung mit ÖNORM B 3303 durchzuführen.

3.4.1 Herstellung der Probemischungen

Die normativen Vorgaben hinsichtlich der zulässigen Temperaturen bzw. Luftfeuchtigkeit für Betonkomponenten, Laborräume und Geräte wurden eingehalten.

3.4.1.1 Geräte und Lagerräume

Die Probwürfel für die Druckfestigkeitsprüfung weisen allesamt Abmessungen von ~ 150 mm auf. Für die Betonherstellung wurden folgende Geräte verwendet:

- Waage (*Sartorius AG Göttingen Model QAT01*) mit einer Ablesegenauigkeit von 10 g für die Betonausgangsstoffe und die Probekörper
- Waage (*Sartorius AG Göttingen Model Q S16000B*) mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1 g für die Betonzusatzmittel
- Labormischer: *Eirich Intensivmischer Typ R08W*
- Wasserlager für die 7-tägige Wasserlagerung der Probekörper
- Raum für die Luftlagerung der Probekörper: Laborgebäude/Halle H (s. Abbildung 3-8).



Abbildung 3-8: Luftlagerung der Probekörper (nach der Entnahme aus dem Wasserbad)

3.4.1.2 Betonkomponenten

Bindemittel, Gesteinskörnungen und Zusatzstoffe wurden, während der gesamten Dauer der Prüfkörperherstellung über trocken im Betonlabor des Institutsgebäudes gelagert. Die Gesteinskörnungen kamen oberflächentrocken zum Einsatz, als Anmachwasser wurde Trinkwasser verwendet.

Folgende Betonkomponenten wurden für die Probekörperherstellung herangezogen:

- Gesteinskörnung Rundkorn 0-4
- Gesteinskörnung Rundkorn 4-8
- Gesteinskörnung Rundkorn 8-16
- Bindemittel: *Portlandhüttenzement EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42*
- Fasern: *Fibrin PP-Faser PM 6/15 K20X1 P 615.1* (Länge 6 mm, d = 15µm)
- Fließmittel: *MAPEI Dynamon SX 14*
- Wasser: Trinkwasser.

3.4.2 Frischbetonprüfung

3.4.2.1 Ausbreitmaß

Folgende Ausbreitmaße wurden im Zuge der Vorversuche gemessen und klassifiziert:

- Charge 1: 76 cm → Konsistenzklasse F 73 (extrem fließfähig)
- Charge 2: 75 cm → Konsistenzklasse F 73 (extrem fließfähig)
- Charge 3: 71 cm → Konsistenzklasse F 73 (extrem fließfähig).

Der Fließmittelanteil wurde im Zuge der Betonrezepterstellung für die Hauptversuche nachgebessert um ein Ausbreitmaß $\leq F59$ gemäß ÖNORM B 4710-1 zu erhalten.

3.4.2.2 Luftporenanteil

Folgende Luftporenanteile wurden im Zuge der Vorversuche gemessen:

- Charge 1: 2,1 %
- Charge 2: 2,3 %
- Charge 3: 2,3 %.

3.4.3 Festbetonprüfung

3.4.3.1 Druckversuche

Die Vorversuchsdruckversuche wurden allesamt in einem Probealter von 7 Tagen durchgeführt. Tabelle 3-3 macht die Ergebnisse der Druckversuche ersichtlich (die Belastungsgeschwindigkeit betrug $0,6 \text{ N/mm}^2\text{s}$):

Tabelle 3-3: Vorversuchsdruckfestigkeiten

Probewürfel / Charge		A [mm ²]	Probendicke a ₀ [mm]	Probenbreite b ₀ [mm]	F _{max} [kN]	σ _m [N/mm ²]
KM-VVPW2 RK01	1	22801	151,5	150,5	760,22	33,34
KM-VVPW4 RK01	2	22875	152,3	150,2	696,02	30,43
KM-VVPW5 RK01	3	22515	150,1	150,0	737,63	32,76
KM-VVPW6 RK01	3	22515	150,1	150,0	744,68	33,07

Der Mittelwert von σ_m beträgt 32,40, Standardabweichung 1,43 und die Varianz 1,78.

Damit errechnet sich der Mittelwert der Betondruckfestigkeit f_{cm} folgendermaßen, die Einteilung in Festigkeitsklassen erfolgt gemäß ÖNORM B4710-1 Tab. NAD13 (Spalte 3):

- RK01: $f_{cm} = 32,40 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{C16/20}$.

Unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten lässt sich eine Festigkeitsklasseneinteilung nach der 28-Tage-Festigkeitsprüfung in die Klasse C25/30 abschätzen.

3.4.3.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt wurde 10 Tage nach dem Betonieren bestimmt und ergab nach einer Trocknungszeit von 4 Tagen bei 105 °C die in Tabelle 3-4 dargestellten Werte, welche auch in etwa dem Feuchtegehalt der Proben beim Brandversuch entsprechen:

Tabelle 3-4: Wassergehalt Vorversuchsprobewürfel

Probewürfel	m _{feucht} [g]	m _{trocken} [g]	w [%]
KM-VVPW2 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	231,0	220,5	4,8
KM-VVPW4 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	232,0	223,5	3,8
KM-VVPW6 RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	281,5	271,0	3,9

Der Mittelwert von w beträgt 4,2, Standardabweichung 0,55 und die Varianz 0,33.

3.5 Vorversuch-Brandversuche

Da die Vorversuche lediglich den Zweck eines „ersten Versuches“ erfüllen sollten, wurden die Brandversuche schon 16 Tage nach Herstellung der Proben durchgeführt. Die Dauer der Brandversuche wurde mit ca. 30 Minuten angesetzt:

- **Versuch I** – 6.12.2006; 15:10 bis 15:43;
KM-VV12-1 RK01, KM-VV12-3 RK01
- **Versuch II** – 6.12.2006; 16:04 bis 16:36;
KM-VV12-2 RK01, KM-HV16-1 RK01.

Die Brandversuche wurden auf dem Institutsparkplatz mittels eines fahrbaren Versuchsofens durchgeführt. Der Brenner (angetrieben durch „Heizöl extra leicht“) ist ein Fabrikat der Fa. *Olymp* und manuell steuerbar. Die Messdaten der auf der Brandkammer platzierten Probekörper wurden über die darin einbetonierten Thermoelemente an eine *Keithley*-Messdatenaufzeichnungseinheit im Institutsgebäude übermittelt. Die Form der Datenausgabe war eine *MS Excel*-Datei, welche die Messdaten aller installierten Messkanäle lieferte - Abbildung 3-9 zeigt die Brandversuchsanordnung.

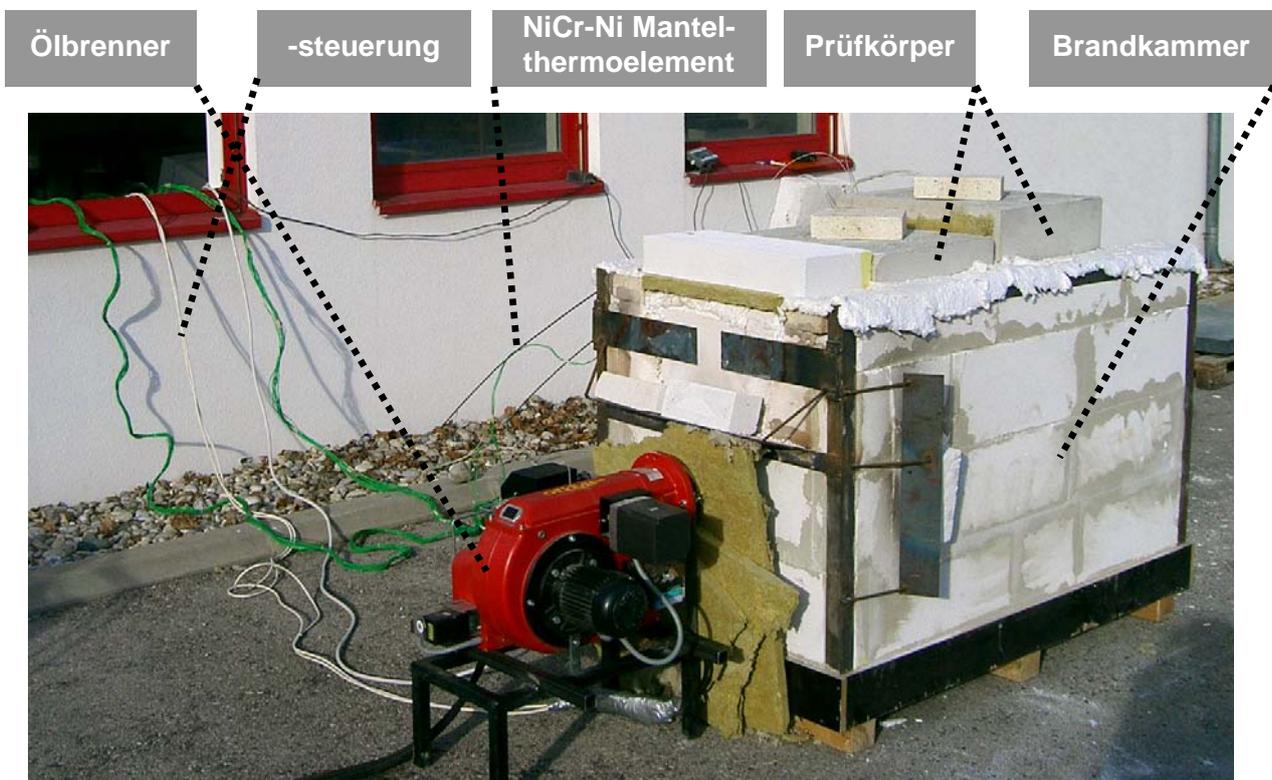


Abbildung 3-9: Brandversuchsanordnung

Die Versuchsbrandkammer weist entsprechend der Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauelemente“ der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik [3] Abmessungen von 122 (Länge) x 55 (Breite) x 85 cm (Höhe) auf und besteht aus einem Stahlrahmen mit Stahlbetonbodenplatte und einer zweischaligen Wandschale aus 10 cm Ytong (außen) und 12,5 cm Feuerfeststeinen (innen) mit 3 zwischenliegenden Silikatmatten. Der Boden der Brandkammer ist ebenfalls mit Silikatmatten ausgelegt und darüberliegenden Ytong-Ziegeln abgedeckt. Abbildung 3-10 zeigt die Brandkammerabmessungen und –aufbauten

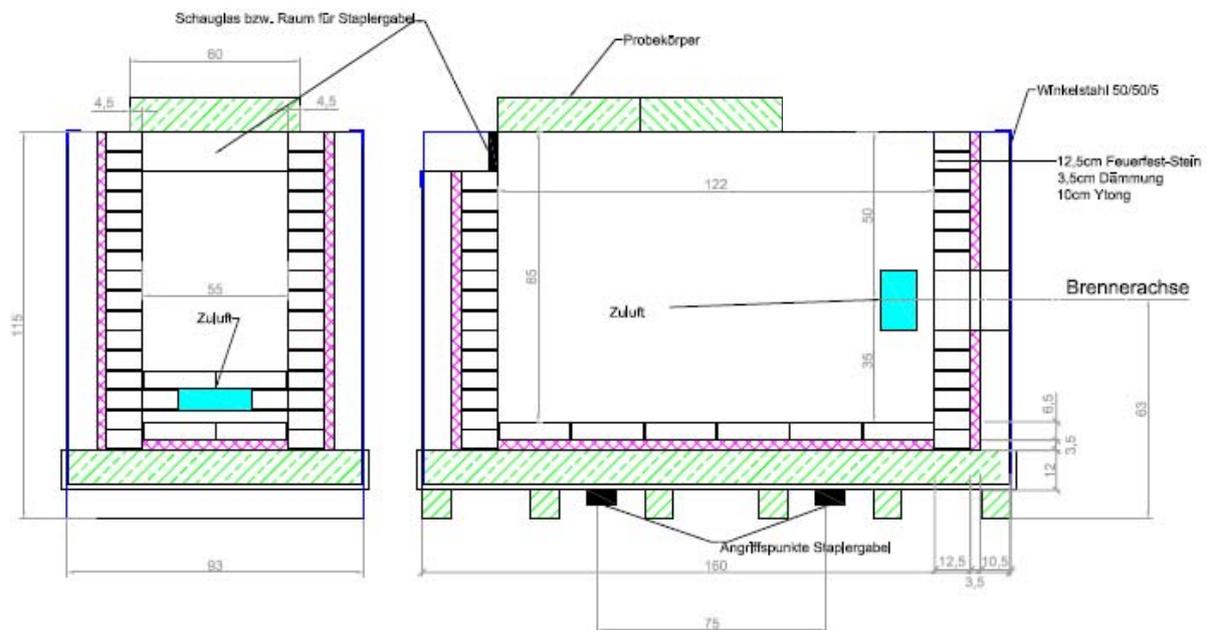


Abbildung 3-10: Brandkammerabmessungen (Baierl, S.47/[16])

Die 2 seitlichen Zuluftöffnungen wurden im Zuge der Hauptversuche mit Ziegeln verschlossen, da sich während der Vorversuche herausstellte, dass das Erreichen der Einheitstemperaturkurve bei offenen Zuluftöffnungen nicht möglich war.

Die Auflage der Probekörper erfolgte auf Silikatwollestreifen, während die Trennung der jeweils zwei auf dem Ofen befindlichen, Probekörper eine Steinwolleplatte war.

Die Messungen erfolgten in Abhängigkeit der Prüfkörperdicke jeweils in Plattenmitte in den Bauteiltiefen 1, 3, 5, 7, 8 (nur Serie HV8), 9, 11, 12 (nur Serie HV12), 13, 15, 16 (nur Serie HV16), 17, 19 und 20 cm (gemessen von der befeuerten Oberfläche).

3.5.1 Platte KM-VV12-1 RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 6.Dezember 2006

Brandversuchsbeginn: 15:10

Brandversuchsende: 15:43

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 83,20 kg

Platte nach Versuch: 81,95 kg

Masseverlust: 1,50 %

Maximale Ofentemperatur: 824 °C



Abbildung 3-11: KM-VV12-1 RK01 nach Brandversuch

3.5.2 Platte KM-VV12-3 RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 6.Dezember 2006

Brandversuchsbeginn: 15:10

Brandversuchsende: 15:43

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 85,70

Platte nach Versuch: 84,25

Masseverlust: 1,91 %

Maximale Ofentemperatur: 824 °C



Abbildung 3-12: KM-VV12-3 RK01 nach Brandversuch

3.5.3 Platte KM-VV12-2 RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 6. Dezember 2006

Brandversuchsbeginn: 16:04

Brandversuchsende: 16:36

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 86,50 kg

Platte nach Versuch: 84,85 kg

Masseverlust: 1,69 %

Maximale Ofentemperatur: 863 °C



Abbildung 3-13: KM-VV12-2 RK01 nach Brandversuch

3.6 Resümee Vorversuche

Die Betonrezeptur wurde geringfügig nachgebessert, da der Fließmittelanteil reduziert wurde um im Zuge der Hauptversuche ein befriedigendes Ausbreitmaß \leq F59 gemäß ÖNORM B 4710-1 Tab. 6 erreichen zu können. Die Reproduzierbarkeit der Mischungen ist gewährleistet.

Die Wasser- und nachfolgende Luftlagerung kann entsprechend ÖNORM durchgeführt werden.

Die Brandversuche bzw. Thermoelemente lieferten für alle 3 geprüften Platten lückenlos Daten, die ETK wurde geringfügig unterschritten, so dass die Luftführung im Ofen und die Brennereinstellung angepasst wurden

Die Druckversuche lieferten bei 4 der 6 geprüften Probewürfel Ergebnisse, welche eine erste Abschätzung der zu erreichenden Betonfestigkeitsklasse zuließen. Die angestrebte Festigkeitsklasse während der Hauptversuche ist C25/30.

4 Hauptversuche

4.1 Betonmischungen

4.1.1 Betonausgangsstoffe

- Gesteinskörnungen, Abbildung 4-1 (bezogen von der Firma *Kiesunion*); die zugehörigen Sieblinienberechnungen sind Tabelle 4-1 bzw. Tabelle 4-2 zu entnehmen.



Abbildung 4-1: Gesteinskörnungen für die Hauptversuche

- Bindemittel - *Portlandhüttenzement EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42*
- Fasern - *Fibrin PP-Faser PM 6/15 K20X1 P 615.1* (Länge 6 mm, d = 15µm)
- Fließmittel - *MAPEI Dynamon SX 14*, Abbildung 4-2
- Wasser.



Abbildung 4-2: Betonkomponenten für die Hauptversuche

4.1.2 Sieblinien der Gesteinskörnungen

Tabelle 4-1: Sieblinienberechnung der Gesteinskörnungen für RK01

Körnung Probe	Siebdurchmesser [mm]	Sieve Size [mm]										Gesamt [g bzw. %]	vor Siebung [g]	Verlust [%]					
		0,00	0,063	0,125	0,250	0,500	1	2	4	8	11				16	22			
1	Siebrückstand [g]	7,0	19,5	47,5	88,5	98,5	33,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	295,0	295,0	0,0	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	7,0	19,5	47,5	88,5	98,5	33,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	295,0	295,0	-	-
0-1	Siebrückstand [g]	7,5	19,0	47,5	86,5	100,5	33,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	295,0	295,0	0,0	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	7,5	19,0	47,5	86,5	100,5	33,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	295,0	295,0	-	-
0-4	Siebrückstand [g]	7,3	19,3	47,5	87,5	99,5	33,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	295,0	295,0	0,0	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	7,3	26,5	74,0	161,5	261,0	294,0	295,0	295,0	295,0	295,0	295,0	295,0	295,0	295,0	295,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	0,025	0,065	0,161	0,297	0,337	0,112	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	-	-
0-4	Siebrückstand [g]	14,0	32,5	72,5	111,5	111,5	127,0	95,5	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	583,5	583,5	1,6	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	14,0	32,5	72,5	111,5	111,5	127,0	95,5	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	583,5	583,5	1,6	1,6
0-4	Siebrückstand [g]	13,5	34,5	73,5	115,0	108,5	122,5	89,5	19,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	576,5	576,5	0,9	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	13,5	34,5	73,5	115,0	108,5	89,5	19,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	13,5	34,5	73,5	115,0	108,5	122,5	89,5	19,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	576,5	576,5	0,9	0,9
0-4	Siebrückstand [g]	13,8	33,8	73,5	114,0	110,8	125,5	93,0	19,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	583,5	583,5	0,2	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	13,8	47,5	121,0	235,0	345,8	471,3	564,3	583,5	583,5	583,5	583,5	583,5	583,5	583,5	583,5	0,2	0,2
	Massenanteil je kg	0,024	0,058	0,126	0,195	0,190	0,215	0,159	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	0,2	0,2
4-8	Siebrückstand [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	968,5	970,0	0,2	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	968,5	969,5	0,3	0,3
4-8	Siebrückstand [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	988,5	988,5	0,3	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	988,5	988,5	0,3	0,3
8-16	Siebrückstand [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1496,0	1500,0	0,3	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1496,0	1500,0	0,3	0,3
8-16	Siebrückstand [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1496,0	1500,0	0,3	
	Mittel Ø Siebdurchgang [g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Massenanteil je kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1496,0	1496,0	0,3	0,3

4.1.3 Betonmischung RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Die Betonrezeptur RK01 sollte während der Brandversuche nicht bzw. kaum Abplatzungen zulassen, weshalb bei der Erstellung der Betonrezeptur Polypropylenfasern mitberücksichtigt wurden. Tabelle 4-3 und Abbildung 4-3 zeigen die Betonrezeptur bzw. die Sieblinie der Mischung RK01.

Tabelle 4-3: Betonrezeptur RK01

Betonkomponente	RK01 (kaum Abplatzungen); Wasser/Bindemittel = 0,55		
	Menge [kg]	Menge [%]	Menge [kg] je Mischung
Zuschlagstoffe		78,35	
RK 0-4	975,0		50,26
RK 4-8	480,0		24,74
RK 8-16	445,0		22,94
Bindemittel		13,86	
Portlandhüttenzement	336,0		17,32
Fasern	1,50	0,06	0,077
Fließmittel	2,52	0,10	0,130
Wasser	185,0	7,63	9,54
Gesamt	2425,0 kg	100 %	125,000 kg

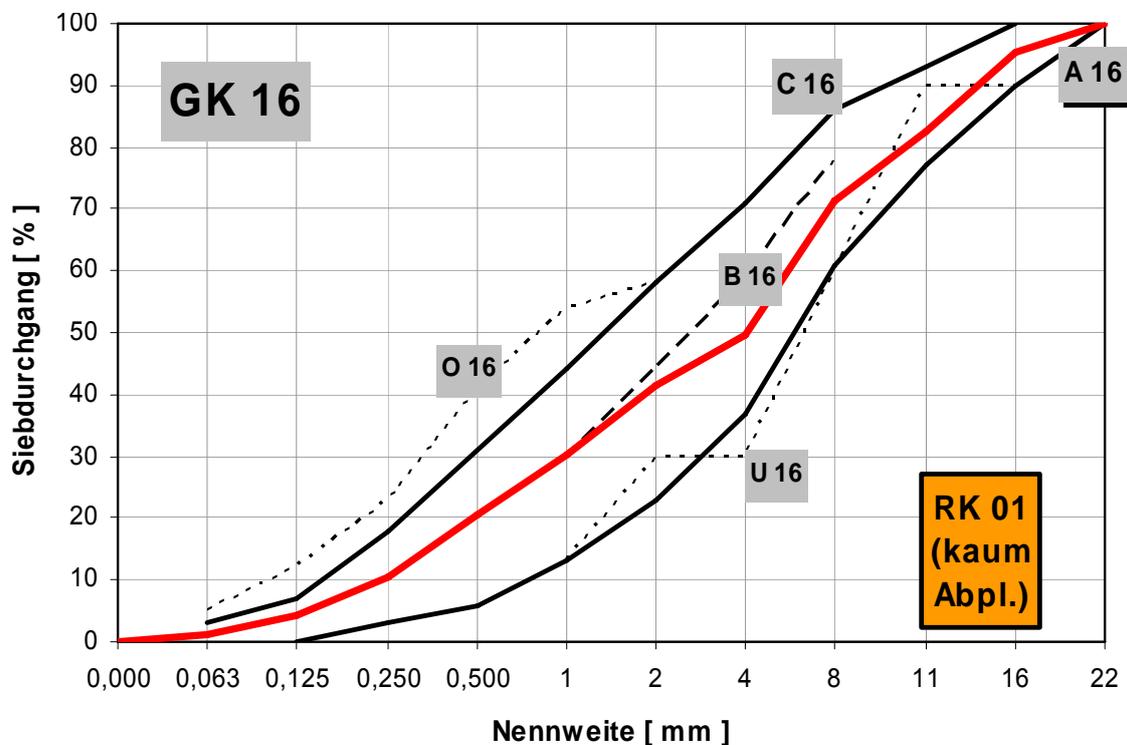


Abbildung 4-3: Sieblinie der Betonmischung RK01

4.1.4 Betonmischung RK02 (ohne PP-Fasern)

Betonrezeptur RK02 unterscheidet sich von RK01 lediglich durch den Verzicht auf die Polypropylenfasern, wodurch die gewünschten Abplatzungen während der Brandversuche gewährleistet werden sollen. Tabelle 4-4 und Abbildung 4-4 zeigen die Betonrezeptur bzw. die Sieblinie der Mischung RK02.

Tabelle 4-4: Betonrezeptur RK02

Betonkomponente	RK02 (Abplatzungen) ; Wasser/Bindemittel = 0,55		
	Menge [kg]	Menge [%]	Menge [kg] je Mischung
Zuschlagstoffe		79,91	
RK 0-1	610,0		31,25
RK 1-4	380,0		19,46
RK 4-8	435,0		22,28
RK 8-16	525,0		26,89
Bindemittel		12,91	
Portlandhüttenzement	315,0		16,14
Fasern	0,00	0,00	0,000
Fließmittel	2,36	0,10	0,121
Wasser	173,0	7,09	8,861
Gesamt	2440,4 kg	100 %	125,000 kg

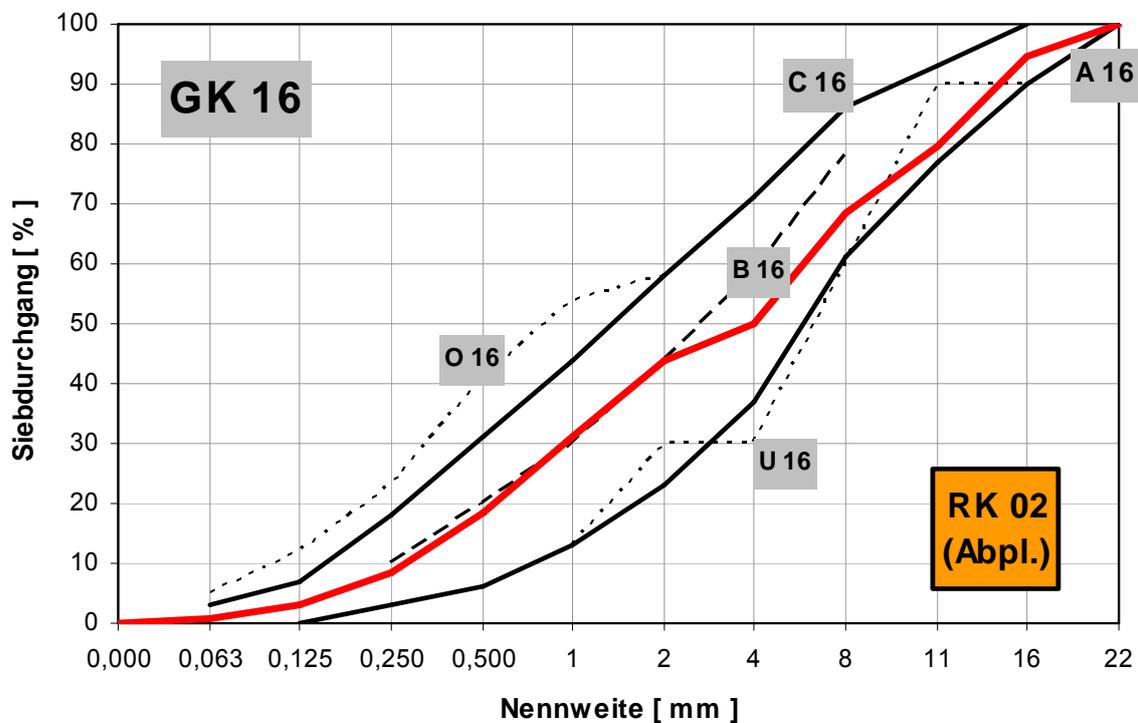


Abbildung 4-4: Sieblinie der Betonmischung RK02

4.1.5 Betonmischung RK01* (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Diese Mischung wurde auf Grund neu gelieferter Körnungen (Zuschlag, Bereiche 0-4 mm) neu zusammengestellt. Für die neuen Körnungen 0-1 mm und 1-4 mm wurde jeweils eine Sieblinie erstellt und darauf folgend eine Betonrezeptur (Tabelle 4-5), welche so nahe wie möglich an der Mischung RK01 liegen sollte, erstellt - Abbildung 4-5 zeigt die Sieblinie.

Tabelle 4-5: Betonrezeptur RK01*

Betonkomponente	RK01* (kaum Abplatzungen) ; Wasser/Bindemittel = 0,55		
	Menge [kg]	Menge [%]	Menge [kg] je Mischung
Zuschlagstoffe		78,35	
RK 0-1	600,0		30,93
RK 1-4	375,0		19,33
RK 4-8	480,0		24,74
RK 8-16	445,0		22,94
Bindemittel		13,86	
Portlandhüttenzement	336,0		17,32
Fasern	1,50	0,06	0,077
Fließmittel	2,52	0,10	0,130
Wasser	185,0	7,63	9,54
Gesamt	2425,0 kg	100 %	125,000 kg

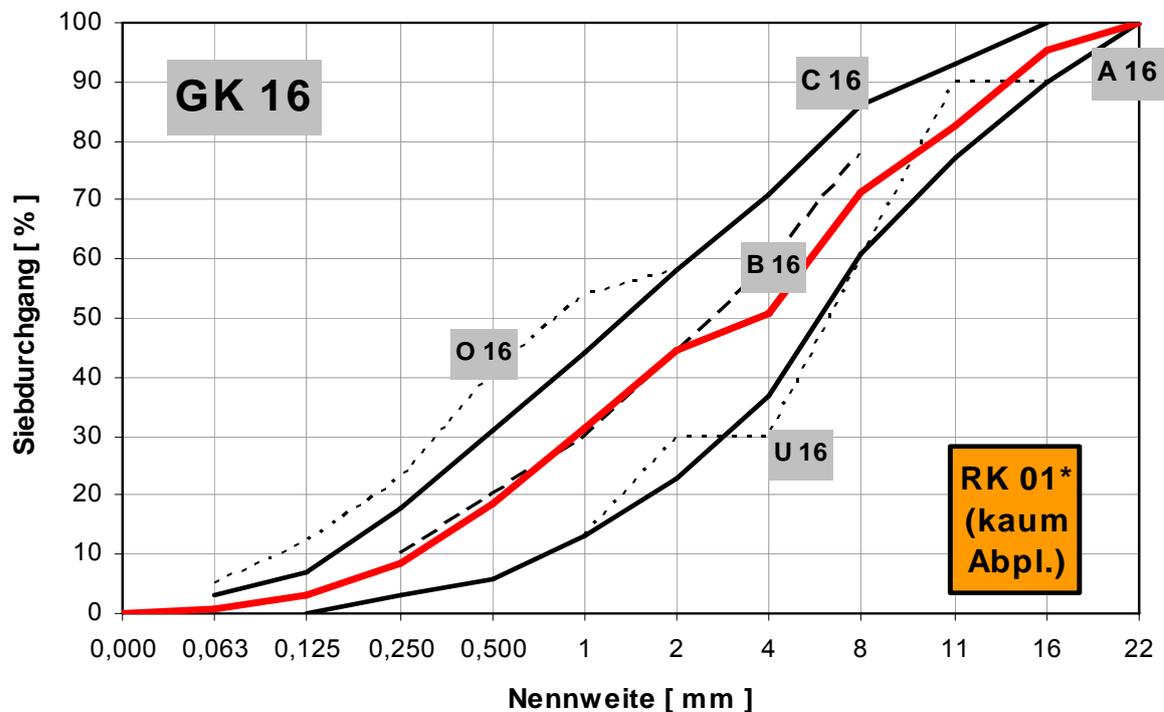


Abbildung 4-5: Sieblinie der Mischung RK01*

4.2 Probekörperherstellung

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Betonierabfolge sowie sämtliche Zugehörigkeiten der Probekörper zu den jeweiligen Mischungen:

- **Charge 1** – 11.12.2006; Ausbreitmaß: 56 cm; Luftporengehalt: 2,3 %
KM-HV8-1 RK01, KM-HV16-1 RK01, KM-HVPW1 RK01, KM-HVPW2 RK01
- **Charge 2** – 11.12.2006; Ausbreitmaß: 57 cm; Luftporengehalt: 2,4 %
KM-HV16-1 RK01 (Forts.), KM-HV8-1 RK01, KM-HVPW3 RK01, KM-HVPW4 RK01
- **Charge 3** – 11.12.2006; Ausbreitmaß: 55 cm;
KM-HV16-2 RK01, KM-HVPW5 RK01, KM-VVPW6 RK01
- **Charge 4** – 11.12.2006;
KM-HV8-3 RK01, KM-HV16-3 RK01, KM-HVPW7 RK01, KM-HVPW8 RK01
- **Charge 5** – 11.12.2006;
KM-HV16-3 RK01 (Forts.), KM-HVPW9 RK01, KM-HVPW10 RK01
- **Charge 6** – 12.12.2006;
KM-HV20-1 RK01 , KM-HVPW11 RK01, KM-HVPW12 RK01
- **Charge 7** – 12.12.2006;
KM-HV20-1 RK01 (Forts.), KM-HV20-2 RK01, KM-HVPW13 RK01,
KM-HVPW14 RK01
- **Charge 8** – 12.12.2006;
KM-HV20-2 RK01 (Forts.), KM-HVPW15 RK01, KM-HVPW16 RK01
- **Charge 9** – 12.12.2006;
KM-HV20-3 RK01 , KM-HVPW17 RK01, KM-HVPW18 RK01
- **Charge 10** – 12.12.2006;
KM-HV20-3 RK01 (Forts.), KM-HV12-1 RK01, KM-HVPW19 RK01,
KM-HVPW20 RK01, KM-HVPW21 RK01
- **Charge 11** – 13.12.2006; Ausbreitmaß: 53 cm; Luftporengehalt: 7,0 %
KM-HV12-2 RK01*, KM-HVPW22 RK01*, KM-HVPW23 RK01*
- **Charge 12** – 13.12.2006; Ausbreitmaß: 53 cm; Luftporengehalt: 7,0 %
KM-HV12-3 RK01*, KM-HVPW24 RK01*, KM-HVPW25 RK01*, KM-HVPW26 RK01*

- **Charge 13** – 13.12.2006; Ausbreitmaß: 53 cm; Luftporengehalt: 2,9 %
KM-HV12-1 RK02, KM-HVPW27 RK02, KM-HVPW28 RK02
- **Charge 14** – 13.12.2006; Ausbreitmaß: 52 cm; Luftporengehalt: 3,1 %
KM-HV12-2 RK02, KM-HVPW29 RK02, KM-HVPW30 RK02
- **Charge 15** – 13.12.2006;
KM-HV12-3 RK02, KM-HVPW31 RK02, KM-HVPW32 RK02.

4.3 Betonprüfung

Zusätzlich zu den Betonprüfungen in Kapitel 2.1 wurde im Zuge der Hauptversuche die Feuchtigkeit der in den Brandversuchen untersuchten Probekörper bestimmt.

Die Betonprüfung hinsichtlich Wassergehalt und Druckfestigkeit wurde an den dafür vorgesehenen Probewürfeln 15x15x15 cm³ durchgeführt.

4.3.1 Frischbetonprüfung

Ausbreitmaß, Luftporenanteil

Folgende Ausbreitmaße wurden im Zuge der Hauptversuche gemessen und gemäß ÖNORM klassifiziert:

Ausbreitmaß	Luftporenanteil
• Charge 1: 56 cm → Konsistenzklasse F 59 (fließfähig)	2,3 %
• Charge 2: 57 cm → Konsistenzklasse F 59 (fließfähig)	2,4 %
• Charge 11: 53 cm → Konsistenzklasse F 52 (sehr weich)	7,0 %
• Charge 12: 53 cm → Konsistenzklasse F 52 (sehr weich)	7,0 %
• Charge 13: 53 cm → Konsistenzklasse F 52 (sehr weich)	2,9 %
• Charge 14: 52 cm → Konsistenzklasse F 52 (sehr weich)	3,1 %.

Der Grund für den hohen Luftporenanteil des Frischbetons der Chargen 11 und 12 (RK01*) ist nicht bekannt. Ein Messfehler bei der Bestimmung der Luftporenanteile kann ausgeschlossen werden, da die entsprechenden Druckfestigkeiten der jeweiligen Probewürfel ebenfalls unter jenen der vergleichbaren Mischung RK01 liegen (s. 4.3.2.1). Eine ungenügende Verdichtung ist denkbar.

Damit wurden 2 Chargen je Betonrezeptur (RK01, RK01* und RK02) betreffend das Ausbreitmaß und den Luftporenanteil untersucht.

4.3.2 Festbetonprüfung

4.3.2.1 Druckversuche

Tabelle 4-6 zeigt die Ergebnisse der Druckversuche nach 28 Tagen Lagerung (die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,6 N/mm²s):

Tabelle 4-6: Hauptversuchsdrukfestigkeiten der Würfel 15x15x15 cm³

Probewürfel / Charge		A [mm ²]	Probendicke a ₀ [mm]	Probenbreite b ₀ [mm]	F _{max} [kN]	σ _m [N/mm ²]
KM-HVPW1 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	1	22485	150,1	149,7	909,05	40,43
KM-HVPW2 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	2	22740	151,7	149,9	1022,60	44,97
KM-HVPW5 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	3	22981	152,7	150,5	980,30	42,66
KM-HVPW7 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	4	22755	151,8	149,9	913,77	40,16
KM-HVPW9 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	5	22500	150,0	150,0	856,06	38,05
KM-HVPW11 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	6	22500	150,0	150,0	904,32	40,19
KM-HVPW13 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	7	22493	150,0	149,9	985,99	43,84
KM-HVPW15 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	8	22402	149,3	150,1	880,18	39,29
KM-HVPW17 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	9	22178	148,1	149,8	939,98	42,38
KM-HVPW19 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	10	22320	148,9	149,9	896,77	40,18
KM-HVPW21 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	10	22455	149,8	149,9	961,18	42,80
KM-HVPW23 RK01* (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	11	22470	150,1	149,7	830,82	36,97
KM-HVPW25 RK01* (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	12	22440	150,2	149,4	807,09	35,97
KM-HVPW26 RK01* (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	12	22559	151,0	149,4	842,10	37,33
KM-HVPW27 RK02 (ohne PP-Fasern)	13	22455	150,3	149,4	1079,06	48,05
KM-HVPW29 RK02 (ohne PP-Fasern)	14	22261	149,0	149,4	1083,10	48,66
KM-HVPW31 RK02 (ohne PP-Fasern)	15	22156	148,3	149,4	961,30	43,39

Der Mittelwert \bar{x} von σ_m für RK01 beträgt 41,36, die Standardabweichung s 2,11 und die Varianz s^2 4,43. Für RK01* beträgt \bar{x} 36,76, s 0,71 und s^2 0,50 – für RK02 ergibt sich \bar{x} zu 46,70, s zu 2,88 und die Varianz s^2 zu 8,31

Bei Betrachtung der ermittelten Spannungen fällt auf, dass im Bereich der Versagensbelastung RK02 im Mittel um 13 % höhere Spannungen als RK01, und um 27 % höhere Spannungen als RK01*, aufweist.

Hauptverantwortlich für die Druckfestigkeitsdifferenzen zwischen den Probekörpern der Rezepturen RK01* und RK01 ist der erhöhte Luftporengehalt bei Mischung RK01*, da RK01 und RK01* nahezu übereinstimmende Sieblinien aufweisen und von dieser Seite keine Beeinflussung zu erwarten ist.

Die Auswirkung des um 4,6 % (RK01*: 7,0 % gegenüber RK01: 2,4 %) höheren Luftporenanteils im Frischbeton schlägt sich also in einer Druckfestigkeitsreduktion um, im Mittel, 11 % nieder.

Der Grund für die höhere Druckfestigkeit der Prüfkörper der Mischung RK02 (mit PP-Fasern) liegt im geringeren Zementgehalt bei RK02. Auf Grund des unveränderten W/B-Wertes ist dies zwar nicht auf eine Veränderung der Struktur und Porosität des Zementsteins, sondern auf die geringere Dicke der Zementsteinhülle um die Zuschlagkörner bei RK02, zurückzuführen.

Der Einfluss des vorhandenen Wassergehaltes w auf die Betonfestigkeit ist auf Grund der vorhandenen Werte von durchschnittlich 3,9 % nur von untergeordneter Bedeutung.

Ermittlung von f_{cm} , Festigkeitsklasseneinteilung

Aus den Tabellenwerten (Tabelle 4-6) errechnet sich der Mittelwert der Betondruckfestigkeiten f_{cm} folgendermaßen. Die Einteilung in Festigkeitsklassen erfolgt gemäß ÖNORM B4710-1 Tab. NAD13 (Spalte 3):

- RK01: $f_{cm} = 41,36 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{C25/30}$
- RK01*: $f_{cm} = 36,76 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{C20/25}$
- RK02: $f_{cm} = 46,70 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{C25/30}$.

4.3.2.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt wurde 28 Tage nach dem Betonieren bestimmt und ergab nach einer Trocknung bei 105 °C Werte gemäß Tabelle 4-7. Diese Werte entsprechen auch in etwa dem Feuchtegehalt der Proben während der Brandversuche. Zur Gewährleistung der

Gewichtskonstanz wurde auf Grund der geringen Probenmassen von durchschnittlich 115 g eine Trocknungszeit im Trockenschrank von zumindest 24 Stunden gewählt.

Tabelle 4-7: Wassergehalt Hauptversuchsprobekörper

Probewürfel	m _{feucht} [g]	m _{trocken} [g]	w [%]	Trockenzeit [h]
KM-HVPW1 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	55,5	53,5	3,7	24
KM-HVPW3 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	163,5	157,0	4,1	
KM-HVPW5 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	115,5	111,0	4,1	
KM-HVPW7 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	354,0	337,5	4,9	
KM-HVPW9 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	109,5	105,5	3,8	
KM-HVPW11 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	72,0	69,5	3,6	72
KM-HVPW13 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	49,0	47,0	4,3	
KM-HVPW15 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	109,5	106,0	3,3	
KM-HVPW17 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	51,0	49,5	3,0	
KM-HVPW19 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	108,0	103,5	4,3	
KM-HVPW21 RK01 (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	106,5	102,0	4,4	
KM-HVPW23 RK01* (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	103,0	99,5	3,5	48
KM-HVPW25 RK01* (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	65,0	62,0	4,8	
KM-HVPW26 RK01* (1,5kg/m ³ PP-Fasern)	141,5	136,0	4,0	
KM-HVPW27 RK02 (ohne PP-Fasern)	99,0	95,5	3,7	
KM-HVPW29 RK02 (ohne PP-Fasern)	165,0	159,0	3,8	
KM-HVPW31 RK02 (ohne PP-Fasern)	83,0	80,0	3,8	

Der mittlere Wassergehalt w errechnet sich nun zu 3,9 %, die Standardabweichung beträgt 0,50 und die Varianz 0,25

4.4 Brandversuchsdurchführung

Die Brandversuche wurden in Serien von je 2 Betonplatten (Ausnahme: KM-HV12-3 RK02 wurde alleine befeuert), welche hintereinander auf dem Ofen platziert wurden, durchgeführt. Tabelle 4-8 enthält eine Übersicht bezüglich der Versuchsreihenfolge, der Probekörper sowie der vorherrschenden Klimadaten (ZAMG, [23]) während der Freiluft-Brandversuche:

Tabelle 4-8: Übersicht Brandversuche

Brandversuch	Versuchsdauer	Angestrebte Brandkurve	Gemessene Temperaturen	PP-Fasern	Probekörper
BV I 8.1.2007 11:10 bis 11:45	35 min	ETK	$T_{\max} = 990 \text{ °C}$ $T_{\text{Umg.}} = 8,3 \text{ °C}$	mit PP-Fasern	KM-HV8-1 RK01 KM-HV8-2 RK01 KM-HVPW2 RK01 KM-HVPW4 RK01
BV II 8.1.2007 12:14 bis 13:19	65 min	ETK	$T_{\max} = 1037 \text{ °C}$ $T_{\text{Umg.}} = 8,9 \text{ °C}$	mit PP-Fasern	KM-HV8-3 RK01 KM-HV16-1 RK01 KM-HVPW8 RK01 KM-HVPW10 RK01
BV III 9.1.2007 10:25 bis 11:15	50 min	ETK	$T_{\max} = 1061 \text{ °C}$ $T_{\text{Umg.}} = 8,9 \text{ °C}$	mit PP-Fasern	KM-HV16-2 RK01 KM-HV16-3 RK01 KM-HVPW6 RK01
BV IV 9.1.2007 11:47 bis 12:33	45 min	ETK	$T_{\max} = 979 \text{ °C}$ $T_{\text{Umg.}} = 12,3 \text{ °C}$	mit PP-Fasern	KM-HV12-1 RK01 KM-HV20-1 RK01 KM-HVPW12 RK01 KM-HVPW14 RK01
BV V 9.1.2007 13:20 bis 14:05	45 min	ETK	$T_{\max} = 976 \text{ °C}$ $T_{\text{Umg.}} = 12,8 \text{ °C}$	mit PP-Fasern	KM-HV20-2 RK01 KM-HV20-3 RK01 KM-HVPW16 RK01 KM-HVPW18 RK01
BV VI 9.1.2007 14:31 bis 15:16	45 min	ETK	$T_{\max} = 804 \text{ °C}$ $T_{\text{Umg.}} = 13,1 \text{ °C}$	mit PP-Fasern	KM-HV12-2 RK01* KM-HV12-3 RK01* KM-HVPW20 RK01* KM-HVPW22 RK01* KM-HVPW24 RK01*
BV VII 9.1.2007 15:40 bis 16:33	53 min	ETK	$T_{\max} = 737 \text{ °C}$ $T_{\text{Umg.}} = 12,9 \text{ °C}$	ohne PP-Fasern	KM-HV12-1 RK02 KM-HV12-2 RK02 KM-HVPW28 RK02 KM-HVPW30 RK02
BV VIII 15.1.2007 12:00 bis 12:46	46 min	ETK	$T_{\max} = 853 \text{ °C}$ $T_{\text{Umg.}} = 9,0 \text{ °C}$	ohne PP-Fasern	KM-HV12-3 RK02 KM-HVPW32 RK02

Die Anordnung der Platten erfolgte mittig über Brandkammer mit einer thermischen Trennung um gegenseitige Beeinflussungen während der Versuchsdauer auszuschließen. Abbildung 4-6 zeigt die Lage der Probekörper auf dem Versuchsofen.

Position 1:.....

- KM-HV8-1 RK01
- KM-HV8-3 RK01
- KM-HV16-2 RK01
- KM-HV12-1 RK01
- KM-HV20-2 RK01
- KM-HV12-2 RK01*
- KM-HV12-1 RK02
- KM-HV12-3 RK02



Position 2:.....

- KM-HV8-2 RK01
- KM-HV16-1 RK01
- KM-HV16-3 RK01
- KM-HV20-1 RK01
- KM-HV20-3 RK01
- KM-HV12-3 RK01*
- KM-HV12-2 RK02

Abbildung 4-6: Versuchskörperanordnung auf der Brandkammer

4.4.1 Platte KM-HV8-1 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 8.Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 11:10

Brandversuchsende: 11:45

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 53,50 kg

Platte nach Versuch: 51,30 kg

Masseverlust: 4,11 %



Abbildung 4-7: KM-HV-1 RK01 nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 990 °C

4.4.2 Platte KM-HV8-2 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 8. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 11:45

Brandversuchsende: 13:19

Vorkommnisse: 11:18 massiver Feuchtigkeitsaustritt auf Plattenoberseite

Platte vor Versuch: 55,55 kg

Platte nach Versuch: 53,20 kg

Masseverlust: 4,23 %



Abbildung 4-8: KM-HV8-2 RK01 nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 990 °C

4.4.3 Platte KM-HV8-3 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 8. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 12:14

Brandversuchsende: 13:19

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 58,85 kg

Platte nach Versuch: 54,30 kg

Masseverlust: 7,73 %



Abbildung 4-9: KM-HV8-3 RK01 nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 1037 °C

4.4.4 Platte KM-HV16-1 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 8. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 12:14

Brandversuchsende: 13:19

Vorkommnisse: 12:23 massiver Wasseraustritt auf Stirnseite

Platte vor Versuch: 114,60 kg

Platte nach Versuch: 109,40 kg

Masseverlust: 4,54 %

Maximale Ofentemperatur: 1037 °C



Abbildung 4-10: KM-HV16-1 RK01 nach Brandversuch

4.4.5 Platte KM-HV16-2 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 10:25

Brandversuchsende: 11:15

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 112,60 kg

Platte nach Versuch: 109,45 kg

Masseverlust: 2,80 %

Maximale Ofentemperatur: 1061 °C



Abbildung 4-11: KM-HV16-2 RK01 nach Brandversuch

4.4.6 Platte KM-HV16-3 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 10:25

Brandversuchsende: 11:15

Vorkommnisse: 10:38
Wasseraustritt

Platte vor Versuch: 112,75 kg

Platte nach Versuch: 109,50 kg

Masseverlust: 2,88 %



Abbildung 4-12: KM-HV16-3 RK01 nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 1061 °C

4.4.7 Platte KM-HV12-1 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 11:47

Brandversuchsende: 12:33

Vorkommnisse: 12:00 Wasser
spritzt aus der
Oberseite
12:05 Erhöhung
Luftzufuhr am
Brenner

Platte vor Versuch: 81,85 kg

Platte nach Versuch: 78,65 kg

Masseverlust: 3,91 %



Abbildung 4-13: KM-HV12-1 RK01 nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 979 °C

4.4.8 Platte KM-HV20-1 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 11:47

Brandversuchsende: 12:33

Vorkommnisse: 12:05 Erhöhung
Luftzufuhr am
Brenner

Platte vor Versuch: 139,15 kg

Platte nach Versuch: 135,20 kg

Masseverlust: 2,84 %



Abbildung 4-14: KM-HV20-1 RK01 nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 979 °C

4.4.9 Platte KM-HV20-2 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 13:20

Brandversuchsende: 14:05

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 138,15 kg

Platte nach Versuch: 134,40 kg

Masseverlust: 2,71 %



Abbildung 4-15: KM-HV20-2 RK01 nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 976 °C

4.4.10 Platte KM-HV20-3 RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 13:20

Brandversuchsende: 14:05

Vorkommnisse: 13:22
Abplatzungen
an Unterseite
13:26
Abplatzungen
klingen ab

Platte vor Versuch: 138,20

Platte nach Versuch: 131,15

Masseverlust: 5,10 %



Abbildung 4-16: KM-HV20-3 RK01 nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 976 °C

4.4.11 Platte KM-HV12-2 RK01* (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 14:31

Brandversuchsende: 15:16

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 78,70 kg

Platte nach Versuch: 75,85 kg

Masseverlust: 3,63 %



Abbildung 4-17: KM-HV12-2 RK01* nach Brandversuch

Maximale Ofentemperatur: 804 °C

4.4.12 Platte KM-HV12-3 RK01* (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 14:31

Brandversuchsende: 15:16

Vorkommnisse: -

Platte vor Versuch: 81,05 kg

Platte nach Versuch: 77,65 kg

Masseverlust: 4,19 %

Maximale Ofentemperatur: 804 °C



Abbildung 4-18: KM-HV12-3 RK01* nach Brandversuch

4.4.13 Platte KM-HV12-1 RK02 (ohne PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 15:40

Brandversuchsende: 16:33

Vorkommnisse: 15:44
vereinzelt
Abplatzungen

Platte vor Versuch: 81,55 kg

Platte nach Versuch: 78,05 kg

Masseverlust: 4,29 %

Maximale Ofentemperatur: 737 °C



Abbildung 4-19: KM-HV12-1 RK02 nach Brandversuch

4.4.14 Platte KM-HV12-2 RK02 (ohne PP-Fasern)

Datum: 9. Jänner 2007

Brandversuchsbeginn: 15:40

Brandversuchsende: 16:33

Vorkommnisse: 15:44
vereinzelte
Abplatzungen

Platte vor Versuch: 86,05 kg

Platte nach Versuch: 83,15 kg

Masseverlust: 3,37 %

Maximale Ofentemperatur: 737 °C



Abbildung 4-20: KM-HV12-2 RK02 nach Brandversuch

4.4.15 Platte KM-HV12-3 RK02 (ohne PP-Fasern)

Datum: 15. Jänner
2007

Brandversuchsbeginn: 12:00

Brandversuchsende: 12:46

Vorkommnisse: 12:03
Abplatzungen
an Unterseite
12:08
Abplatzungen
klingen ab

Platte vor Versuch: 83,55 kg

Platte nach Versuch: 80,20 kg

Masseverlust: 4,01 %

Maximale Ofentemperatur: 853 °C



Abbildung 4-21: KM-HV12-3 RK02 nach Brandversuch

4.4.16 Probewürfel

Tabelle 4-9 zeigt den brandversuchsbedingten Masseverlust der im Brandofen jeweils beflamnten Probewürfel. Die Masseverluste entstanden durch Feuchtigkeitsverluste und Abplatzungen, wobei die Brandversuchsdauer massive Auswirkungen auf den Masseverlust hat. Während der durchschnittliche Masseverlust bei einer Brandversuchsdauer von etwa 30 Minuten bei ca. 9 % liegt, konnten bei Branddauern von 60 Minuten Masseverluste von ca. 15 % beobachtet werden. Bei einer Branddauer von 45 Minuten stellt sich ein mittlerer Masseverlust von ca. 12 % ein.

Tabelle 4-9: Masseverluste Hauptversuchsprobewürfel nach Brand

Probewürfel	Brandversuch	T_{\max}	Branddauer	vor Versuch	nach Versuch	Masseverlust
KM-HV-PW2 (mit PP-Fasern)	BV I	$T_{\max} = 990 \text{ °C}$	35 min	7,55 kg	6,85 kg	9,27 %
KM-HV-PW4 (mit PP-Fasern)	BV I	$T_{\max} = 990 \text{ °C}$	35 min	7,70 kg	7,05 kg	8,44 %
KM-HV-PW8 (mit PP-Fasern)	BV II	$T_{\max} = 1037 \text{ °C}$	65 min	7,70 kg	6,55 kg	14,94 %
KM-HV-PW10 (mit PP-Fasern)	BV II	$T_{\max} = 1037 \text{ °C}$	65 min	7,85 kg	6,65 kg	15,29 %
KM-HV-PW6 (mit PP-Fasern)	BV III	$T_{\max} = 1061 \text{ °C}$	50 min	7,75 kg	6,90 kg	10,97 %
KM-HV-PW12 (mit PP-Fasern)	BV IV	$T_{\max} = 979 \text{ °C}$	45 min	7,65 kg	6,65 kg	13,07 %
KM-HV-PW14 (mit PP-Fasern)	BV IV	$T_{\max} = 979 \text{ °C}$	45 min	7,60 kg	6,60 kg	13,16 %
KM-HV-PW16 (mit PP-Fasern)	BV V	$T_{\max} = 976 \text{ °C}$	45 min	7,75 kg	6,70 kg	13,55 %
KM-HV-PW18 (mit PP-Fasern)	BV V	$T_{\max} = 976 \text{ °C}$	45 min	7,65 kg	6,60 kg	13,73 %
KM-HV-PW20 (mit PP-Fasern)	BV VI	$T_{\max} = 804 \text{ °C}$	45 min	7,55 kg	6,70 kg	11,26 %
KM-HV-PW22 (mit PP-Fasern)	BV VI	$T_{\max} = 804 \text{ °C}$	45 min	7,55 kg	6,70 kg	11,26 %
KM-HV-PW24 (mit PP-Fasern)	BV VI	$T_{\max} = 804 \text{ °C}$	45 min	7,35 kg	6,45 kg	12,24 %
KM-HV-PW28 (ohne PP-Fasern)	BV VII	$T_{\max} = 737 \text{ °C}$	53 min	7,80 kg	6,95 kg	10,90 %
KM-HV-PW30 (ohne PP-Fasern)	BV VII	$T_{\max} = 737 \text{ °C}$	53 min	7,85 kg	6,85 kg	12,74 %
KM-HV-PW32 (ohne PP-Fasern)	BV VIII	$T_{\max} = 853 \text{ °C}$	46 min	7,80 kg	5,50 kg	29,49 % (große Abpl.)

Auf die Ermittlung von Mittelwerten, Standardabweichungen und Varianzen wird an dieser Stelle auf Grund der verschiedenen langen Brandbeanspruchungen der Probewürfel verzichtet.

4.5 Restfestigkeitsuntersuchungen

Zur Restfestigkeitsuntersuchung wurden ausschließlich die dafür bestimmten, und in Tabelle 4-9 angeführten, Probewürfel herangezogen. Tabelle 4-10 zeigt die Ergebnisse der Druckversuche ersichtlich:

Tabelle 4-10: Zusammenstellung der Druckversuchsergebnisse

Probewürfel / Charge		A [mm ²]	Proben- dicke a ₀ [mm]	Proben- breite b ₀ [mm]	F _{max} [kN]	σ _m [N/mm ²]	Brandversuch	T _{max}
KM-HVPW2 RK01	1	22648	151,6	151,5	360,02	15,90	BV I (35 min)	T _{max} = 990 °C
KM-HVPW4 RK01	2	22982	150,9	152,3	341,34	14,85	BV I (35 min)	T _{max} = 990 °C
KM-HVPW8 RK01 (Anm.: fiel zu Boden → Abplatzungen vor Druckversuch)	3	22952	152,2	150,8	181,06	7,89	BV II (65 min)	T _{max} = 1037 °C
KM-HVPW10 RK01	4	22740	150,4	151,2	266,79	11,73	BV II (65 min)	T _{max} = 1037 °C
KM-HVPW6 RK01 (Anm.: schon vor Versuch extreme Abplatzungen)	5	22935	150,0	152,9	169,06	7,37	BV III (50 min)	T _{max} = 1061 °C
KM-HVPW12 RK01	6	23149	152,8	151,5	153,72	6,64	BV IV (45 min)	T _{max} = 979 °C
KM-HVPW14 RK01	7	22801	151,5	150,5	148,09	6,50	BV IV (45 min)	T _{max} = 979 °C
KM-HVPW16 RK01	8	22967	151,6	151,5	242,37	10,55	BV V (45 min)	T _{max} = 976 °C
KM-HVPW18 RK01	9	23119	152,5	151,6	225,04	9,73	BV V (45 min)	T _{max} = 976 °C
KM-HVPW20 RK01	10	23256	152,8	152,2	238,70	10,26	BV VI (45 min)	T _{max} = 804 °C
KM-HVPW22 RK01*	11	23255	153,4	151,6	243,02	10,45	BV VI (45 min)	T _{max} = 804 °C
KM-HVPW24 RK01*	12	23074	151,6	152,2	178,39	7,73	BV VI (45 min)	T _{max} = 804 °C
KM-HVPW28 RK02	13	22846	151,2	151,1	399,47	17,49	BV VII (53 min)	T _{max} = 737 °C
KM-HVPW30 RK02	14	22725	151,4	150,1	360,35	15,86	BV VII (53 min)	T _{max} = 737 °C
KM-HVPW32 RK02	15	22470	150,3	149,5	459,99	20,47	BV VIII (46 min)	T _{max} = 853 °C

Auf die Ermittlung von Mittelwerten, Standardabweichungen und Varianzen wird an dieser Stelle auf Grund der verschiedenen langen Brandbeanspruchungen der Probewürfel verzichtet.

Bedingt durch den hohen Festigkeitsverlust in Folge der teilweise verschieden langen Brandversuche, ergeben sich bei der Bestimmung der Restdruckfestigkeit große Unterschiede hinsichtlich der maximal aufnehmbaren Druckkräfte.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass sämtliche Probekörperabmessungen mittels elektronischer Schiebelehren ermittelt wurden. Davon ausgehend entsteht die Problematik, dass, bedingt durch minimale Differenzen in den Befüllungshöhen, sowie den Kunststoffschalungen selbst, die Probekörper gewisse Schwankungen in den Bauteilabmessungen aufweisen, welche wiederum Einfluss auf die Ermittlung vom σ_m haben, wobei zu betonen ist, dass diese Einflüsse nur minimal sind.

Tabelle 4-11 vergleicht die aufnehmbaren Druckfestigkeiten der Probewürfel der verschiedenen Mischungschargen nach der 28-Tage-Prüfung und nach den Brandversuchen:

Tabelle 4-11: Vergleich Druckfestigkeiten (vor bzw. nach Brandbelastung)

Probewürfel / Charge		28-Tage-Festigk.		nach Brandversuch		% von 28-Tage-Festigkeit [%]	Branddauer [min] / T_{max} [°C]	
		F_{max} [kN]	σ_m [N/mm ²]	F_{max} [kN]	σ_m [N/mm ²]			
KM-HVPW1(2) RK01	1	909,05	40,43	360,02	15,90	39,3	35 min / 990 °C	
KM-HVPW3(4) RK01	2	1022,6	44,97	341,34	14,85	33,0		
KM-HVPW5(6) RK01	3	980,3	42,66	181,06	7,37	19,4	50 min / 1061 °C	
KM-HVPW7(8) RK01	4	913,77	40,16	266,79	7,89	18,5	65 min / 1037 °C	
KM-HVPW9(10) RK01	5	856,06	38,05	169,06	11,73	29,2		
KM-HVPW11(12) RK01	6	904,32	40,19	153,72	6,64	16,5	46 min / 979 °C	
KM-HVPW13(14) RK01	7	985,99	43,84	148,09	6,50	14,8		
KM-HVPW15(16) RK01	8	880,18	39,29	242,37	10,55	26,9	45 min / 976 °C	
KM-HVPW17(18) RK01	9	939,98	42,38	225,04	9,73	23,0		
KM-HVPW19(20) RK01	10	896,77	40,18	238,7	10,26	25,5	45 min / 804 °C	
KM-HVPW21(20) RK01		961,18	42,80					
KM-HVPW23(22) RK01*	11	830,82	36,97	243,02	10,45	28,3		
KM-HVPW25(24) RK01*	12	807,09	35,97	178,39	7,73	21,5		
KM-HVPW26(24) RK01*		842,10	37,33					
KM-HVPW27(28) RK02	13	1079,06	48,05	399,47	17,49	36,4		53 min / 737 °C
KM-HVPW29(30) RK02	14	1083,1	48,66	360,35	15,86	32,6		
KM-HVPW31(32) RK02	15	961,3	43,39	459,99	20,47	47,2		46 min / 853 °C

Die Werte aus Tabelle 4-11 korrespondieren mit den Beobachtungen der befeuerten Oberflächen der Probekörper nach den Brandversuchen. Während die getesteten Probewürfel der Betonrezepturen RK01 und RK01*, bedingt durch den Abfall der dehydrierten Schichten starke Oberflächenfestigkeitsverluste verzeichneten, war bei den Probekörpern der Betonrezeptur RK02 selbst Wochen nach den Brandversuchen keine sichtbare Beeinträchtigung der befeuerten Oberflächen feststellbar. Die bildliche Dokumentation dieses Sachverhalts ist unter 5.4 dargestellt.

Grund dafür ist das so genannte **Kalktreiben**, welches unter Wasserzutritt zu einer Volumenzunahme des Freikalks im Zementklinkerkorn führt. Unmittelbar nach Brandbelastung beginnt nun die Bildung von Kalkhydrat und bewirkt so eine 1,7 fache Ausdehnung und führt im Inneren des Betons schließlich zu Zugspannungen, die bei Überschreitung der jeweiligen Zugfestigkeit die Bauteilzerstörung herbeiführen.

Der Wasserzutritt wird dabei erst durch die Kombination des Ausschmelzens der PP-Fasern und der hitzebedingten Zerstörung des Portlandzements während der Brandversuche möglich (*Schneider*, S.60/[45]). Dies erklärt auch weshalb die Proben der Mischung RK02 (ohne PP-Fasern) keine sichtbare Oberflächenzermürbungen aufwiesen.

Die Probewürfel KM-PW27 bis 32 (RK02) wiesen selbst nach einer Brandversuchsdauer von mindestens 46 Minuten noch immer eine durchschnittliche Druckfestigkeit von 17,94 N/mm² auf, was einem durchschnittlichen Festigkeitsverlust von 61,3 % entspricht. Im Gegensatz dazu betrug der durchschnittliche Festigkeitsverlust der Prüfkörper mit der Betonrezeptur RK01 78,3 %. Die Probekörper der Mischung RK01* zeigten einen Druckfestigkeitsrückgang um 75,1 %, allerdings ausgehend von einer weitaus geringeren 28-Tage-Festigkeit (im Mittel: 36,76 N/mm² gegenüber RK01: 41,36 N/mm²).

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird zusätzlich durch die unterschiedlichen Maximaltemperaturen während der Brandversuche beeinflusst. So erfuhren die Probewürfel KM-HVPW5 RK01 bis KM-HVPW10 RK01 mit $T_{\max} = 1061$ bzw. 1037 °C durchwegs höhere Temperaturen als beispielsweise die Probewürfel KM-HVPW11 RK01 bis KM-HVPW14 RK01 mit $T_{\max} = 979$ °C und wiesen trotzdem noch höhere Restdruckfestigkeiten auf. Eine seriöse Vergleichbarkeit der ermittelten Restdruckfestigkeiten ist jedoch nur auf Basis gleicher Brandbelastungskurven gegeben.

Abbildung 4-22 zeigt, dass die Probekörper KM-HVPW1(2) und KM-HVPW3(4) höheren Restfestigkeiten aufweisen, da diese Probewürfel nur 30 Minuten mit $T_{\max} = 990 \text{ °C}$ befeuert wurden.

Besonders der Vergleich der Probewürfel KM-HVPW1(2) und KM-HVPW3(4) bzw. KM-HVPW11 RK01 bis KM-HVPW18 RK01 unterstreicht auf Grund der vergleichbaren Höchsttemperaturen in der Brandkammer (s. Tabelle 4-11) die positiven Auswirkungen einer kürzeren Brandbelastungsdauer auf die Restdruckfestigkeiten.

Abbildung 4-22 illustriert die zuvor beschriebenen Sachverhalte.

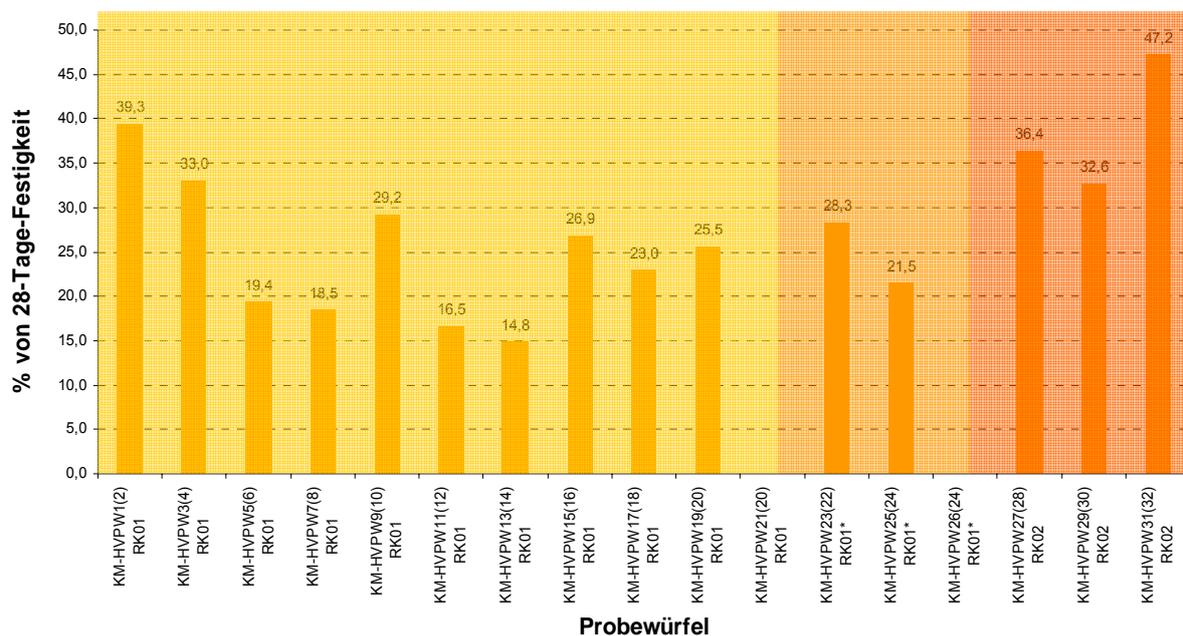


Abbildung 4-22: Restfestigkeit im Verhältnis zur 28-Tage-Festigkeit

Bezüglich der Bruchdehnungen konnten übereinstimmend mit [2] deutlich erhöhte Werte der zuvor brandbeanspruchten Probewürfel gegenüber den unbefeuerten Probewürfeln beobachtet werden. Abbildung 11-2 (im Anhang) zeigt vorhandene Bruchdehnungen der befeuerten Probewürfel von bis zu 5 mm während die entsprechenden Bruchdehnungen der unbefeuerten Würfel lediglich 1 mm betragen (Abbildung 11-1).

Die Zunahme der Bruchdehnungen bedeutet eine Steigerung der Betonduktilität. Die sinkenden Druckfestigkeiten bei Temperaturen über 600 °C lassen zusätzlich auf einen ebenfalls sinkenden E-Modul schließen, wobei ein Rückgang der Elastizität schon bei kleineren Temperaturen zu beobachten ist (Schneider, S.299/[2]).

5 Brandversuchsauswertung

Die Brandversuchsauswertung zielt darauf ab, die in den Brandversuchen erhaltenen Daten zu untersuchen, zu sortieren, zu interpretieren und fehlerhafte Messungen zu eliminieren. Deshalb wurde schon im Vorfeld der Versuche eine gewisse Ungenauigkeit der Messumstände in die Überlegungen einbezogen und die Prüfserienstückzahl zu je drei Probekörpern festgesetzt. Dies sollte im weiteren Verlauf die Möglichkeit geben, fehlerhafte Messungen zu erkennen, diese aus den folgenden Berechnungen auszuschließen und noch immer in der Lage zu sein einen Mittelwert aus den nun zwei verbleibenden Messwertreihen bilden zu können.

Schon vor Beginn der Brandvorversuche wurden Überlegungen bezüglich der zu erwartenden Ergebnisse angestellt. Bei Betrachtung von Abbildung 2-8 erschien dabei eine, wenn auch nur geringe, Temperaturabhängigkeit von der Bauteildicke als wahrscheinlich. Das Ausmaß dieser Abhängigkeit war vor den Versuchen nicht bekannt.

Während der Brandversuchsauswertung kam es zu einer Bewertung der gemessenen Temperaturdaten mit dem Ziel, auftretende Zusammenhänge der Temperaturverteilung im Normalbetonbauteil mit der Bauteildicke zu beschreiben. Die Vorgangsweise dabei umfasste einerseits die Darstellung der Messdaten der 15 Thermoelemente in den Prüfkörpern, sowie die Erstellung von Diagrammen, um die erwarteten Zusammenhänge und Abhängigkeiten erkennen zu können und diese hinreichend genau zu beschreiben.

Abschließend sollten die gemessenen Temperaturverläufe, aufgegliedert nach Prüfserien, mit den entsprechenden Ergebnissen einer Computersimulation verglichen werden. Dazu wurden Bauteiltemperaturverläufe für die Prüfkörperserie HV8 (8 cm dicke Normalbetonplatte) mit Hilfe der Brandsimulationssoftware *MRFC Version 2.5* unter Berücksichtigung des vorhandenen Wassergehalts im Beton berechnet und mit den gemessenen Temperaturverläufen verglichen. Zusätzlich wurden Simulationen für die Bauteildicken 4, 8, 20 und 24 cm durchgeführt und kommentiert.

Die Resultate dieses Vergleichs der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Temperaturverläufen sollen es ermöglichen, eine Aussage über das Verhältnis von Simulationswerten zu praktischen Versuchsreihen zu formulieren und umgekehrt eventuell fehlerhafte Messreihen zu erkennen und zu eliminieren.

5.1 Vorgangsweise während der Versuchsauswertung

Folgende Auflistung umreißt die Vorgangsweise während der Versuchsauswertung und der Interpretation der Ergebnisse:

- Darstellung der **gemessenen Temperaturkurven aller 15 Prüfkörper** (inkl. erster Interpretation der erhaltenen Temperaturverläufe) – s. Kapitel 5.2 (Anm.: Eine gesamtheitliche Darstellung der Messwerte aller 3 Prüfkörper einer Serie war auf Grund der mangelnden Übersichtlichkeit nicht möglich)
- Untersuchung der **vorhandenen Brandkammertemperaturen** im Vergleich zu der angestrebten Einheitstemperaturkurve – s. Kapitel 5.3
- Darstellung sonstiger Beobachtungen während der Brandversuche – s. Kapitel 5.4
- Elimination fehlerhafter Messreihen und Errechnung von gemittelten Temperaturverläufen je Messtiefe und Prüfserie –
- Darstellung der **gemittelten Temperaturverläufe der Prüfserien** HV8 RK01, HV12 RK01, HV16 RK01, HV20 RK01 und HV12 RK02 je Messtiefe (inkl. Interpretation) - s. Kapitel 5.5.1
- Untersuchung der **mittleren Brandkammertemperaturen** – s. Kapitel 5.5.2
- **Vergleich der mittleren Temperaturkurven der Prüfserien** – s. Kapitel 5.5.3
- Darstellung von Temperaturverteilungen aller Prüfserien in Abhängigkeit der Branddauer - 5.5.4
- Softwaresimulation mittels *MRFC Version 2.5* einschließlich Simulationsauswertung – s. Kapitel 5.6
- **Vergleich Messergebnisse-Simulation** – s 5.6.1.2
- Falls erforderlich: **Anpassung** der Wärmeübergangszahl α bzw. der Gesamtemissionszahl ϵ mit dem Ziel die Randbedingungen der Softwaresimulation den Randbedingungen während der Brandversuche anzugleichen – s. 5.6.1.2
- Diskussion der **bauteldickenabhängigen Temperaturverläufe gemäß MRFC-Simulationen** (untersuchte Bauteildicken zwischen 4 und 24 cm) – s. Kapitel 5.6.1.3.

5.2 Temperaturkurven Brandversuche

Die Darstellung der gemessenen Temperaturkurven erfolgt nach der Dicke der untersuchten Platten und nicht nach der Abfolge der Brandversuche:

- 3 Platten der Dicke 8 cm RK01...mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern (Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-3)
- 3 Platten der Dicke 12 cm RK01(*)...mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern (Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-6)
- 3 Platten der Dicke 16 cm RK01...mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern (Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-10)
- 3 Platten der Dicke 20 cm RK01...mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern (Abbildung 5-11 bis Abbildung 5-14)
- 3 Platten der Dicke 12 cm RK02...ohne PP-Fasern (Abbildung 5-15 bis Abbildung 5-17).

Probekörper KM-HV8 RK01 (Plattendicke 8 cm, mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-3 zeigen die Messergebnisse der 8 cm dicken, PP-Faserverstärkten Normalbetonplatten.

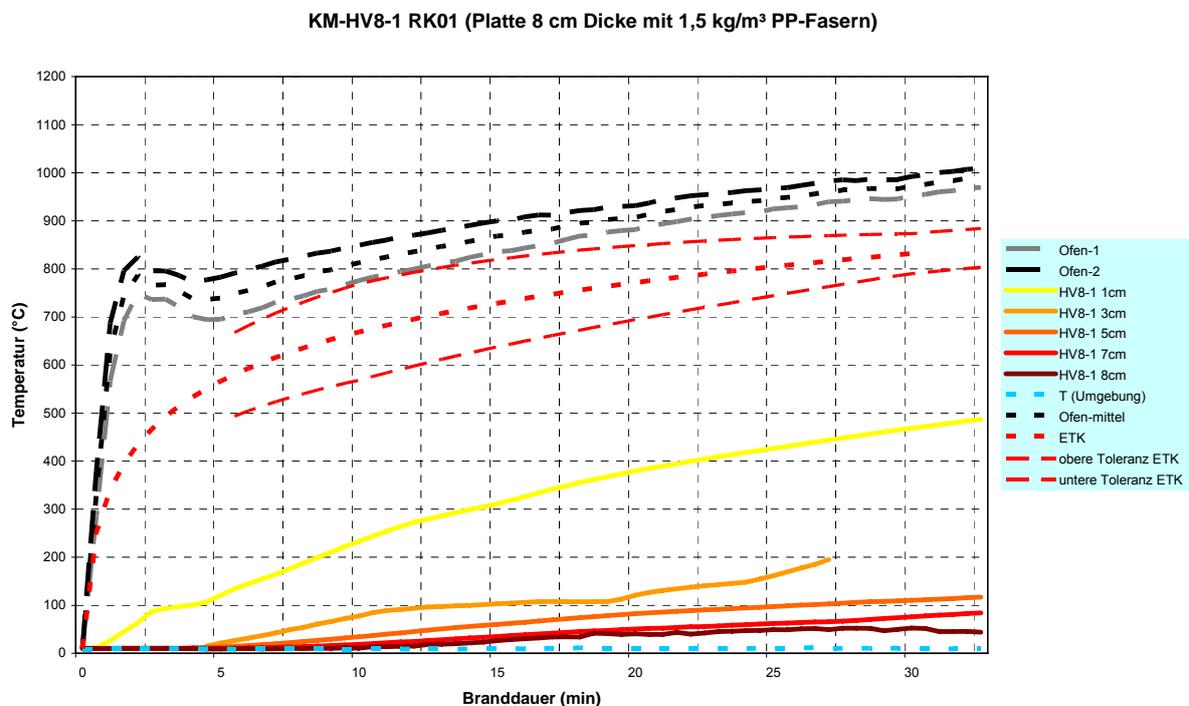


Abbildung 5-1: Temperaturkurve KM-HV8-1 RK01 (Brandversuch 1)

Abbildung 5-1 verdeutlicht, dass die ETK während des gesamten Brandversuches deutlich überschritten wurde und zusätzlich oberhalb des Toleranzbereiches lt. ÖNORM EN 1363-1 lag. Die Verflachung der Brandkammertemperaturen im Bereich Minute 2,5 bis Minute 5 ist durch eine manuelle Reduktion der Brennstoffzufuhr erklärbar, da eine Überschreitung der Einheitstemperaturkurve ersichtlich und ein Gegensteuern erforderlich war.

Wie in Abbildung 5-1 ersichtlich lieferte der Messkanal in 3 cm Bauteiltiefe ab ca. 27,5 Minuten keine Daten mehr. Dies hatte Auswirkungen auf die Auswertungen, da die Platte KM-HV8-3 RK01 ebenfalls (ab Minute 22) keine Messergebnisse liefern konnte (siehe Abbildung 5-3).

Abbildung 5-2 basiert ebenfalls auf Brandversuch 1, zeigt jedoch Platte KM-HV8-2 RK01. Deutlich erkennbar ist eine offenbar fehlerbehaftete Messdatenübertragung des Kanals in 1 cm Bauteiltiefe. Bei Betrachtung von Abbildung 5-2 fällt jedoch auf, dass in den Bereichen unmittelbar vor bzw. nach dem „Einbruch“ der Messwerte Übereinstimmung mit jenen Werten der Platte KM-HV8-1 RK01 (Abbildung 5-1) herrscht.

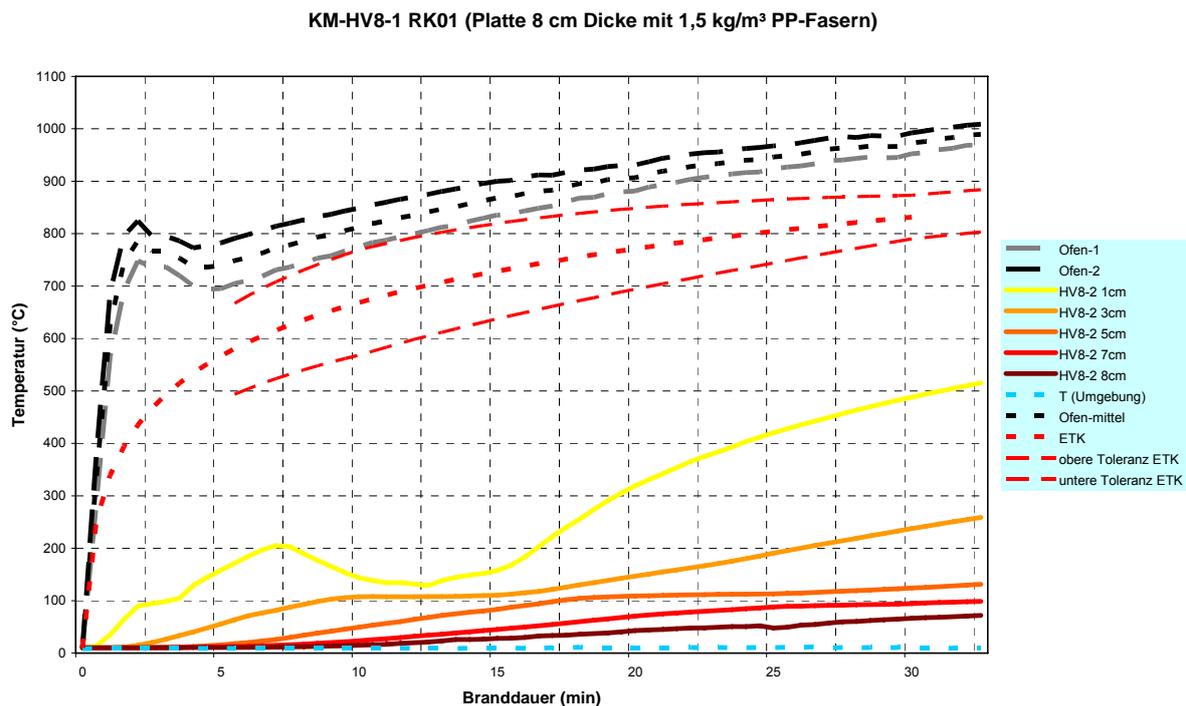


Abbildung 5-2: Temperaturkurve KM-HV8-2 RK01 (Brandversuch 1)

Bei Platte KM-HV8-3 wurde nachträglich eine Kontrolle der korrekten Lage der Messdrähte im Bauteil vorgenommen. Die Untersuchung bestätigte die korrekte Lage der Messdrähte in den Messtiefen 1, 3, 5 und 7 cm.

Platte KM-HV8-3 wurde einer längeren Branddauer unterzogen als KM-HV8-1 RK01 und KM-HV8-2 RK01, da diese zeitgleich mit KM-HV16-1 RK01 geprüft wurde (Abbildung 5-3). Auch hier wurde der Toleranzbereich der ETK überschritten.

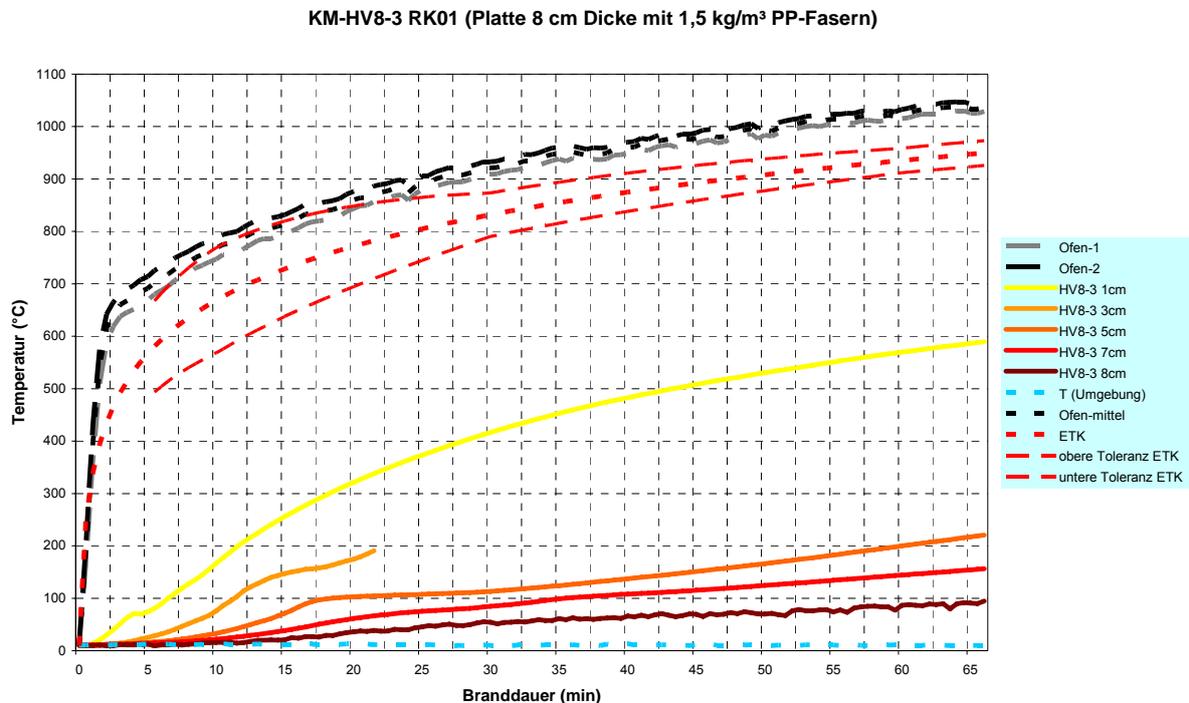


Abbildung 5-3: Temperaturkurve KM-HV8-3 RK01 (Brandversuch 2)

Probekörper KM-HV12 RK01^(*) (Plattendicke 12 cm, mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Bei Betrachtung der Platten KM-HV12-1 RK01 (Abbildung 5-4), KM-HV12-2 RK01^{*} (Abbildung 5-5) und KM-HV12-3 RK01^{*} (Abbildung 5-6) sind keine offensichtlich fehlerhaften Messdaten erkennbar. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass die Temperaturen in Platte KM-HV12-2 RK01^{*} in 1 cm Bauteiltiefe um ca. 150 - 200 °C höher sind als jene der anderen zwei, der Prüfserie 12 cm RK01 zugehörigen, Versuchskörper. Der Einfluss zu hoher Brandkammertemperaturen kann dabei ausgeschlossen werden, da die Brandkammertemperaturen bei Versuch 5 höher als bei Versuch 6 waren. Es liegt also der Schluss nahe, dass der betreffende Messdraht eventuell Kontakt mit der Bewehrung erfahren hat bzw. die Bewehrung die Temperatur in diesem Bereich massiv erhöht hat.

Auch in der Tiefe 3 cm, und nur noch sehr abgeschwächt in Bauteiltiefe 5 cm, sind in Probekörper KM-HV12-2 RK01^{*} erhöhte Temperaturen ablesbar, weshalb dieser Bauteil im Zuge der weiteren Auswertung ausgeschlossen wurde.

Der Einfluss von Abplatzungen kommt nicht in Frage, da während des gesamten Brandversuches keine entsprechenden Beobachtungen gemacht wurden.

KM-HV12-1 RK01 (Platte 12 cm Dicke mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

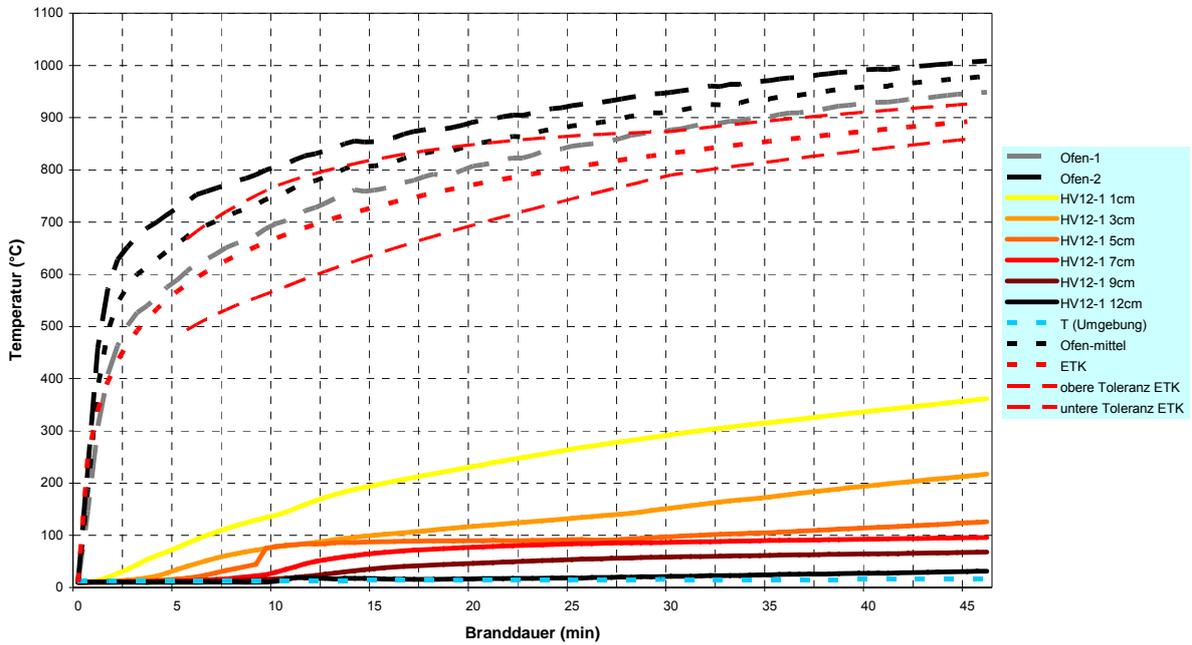


Abbildung 5-4: Temperaturkurve KM-HV12-1 RK01 (Brandversuch 4)

KM-HV12-2 RK01 (Platte 12 cm Dicke mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

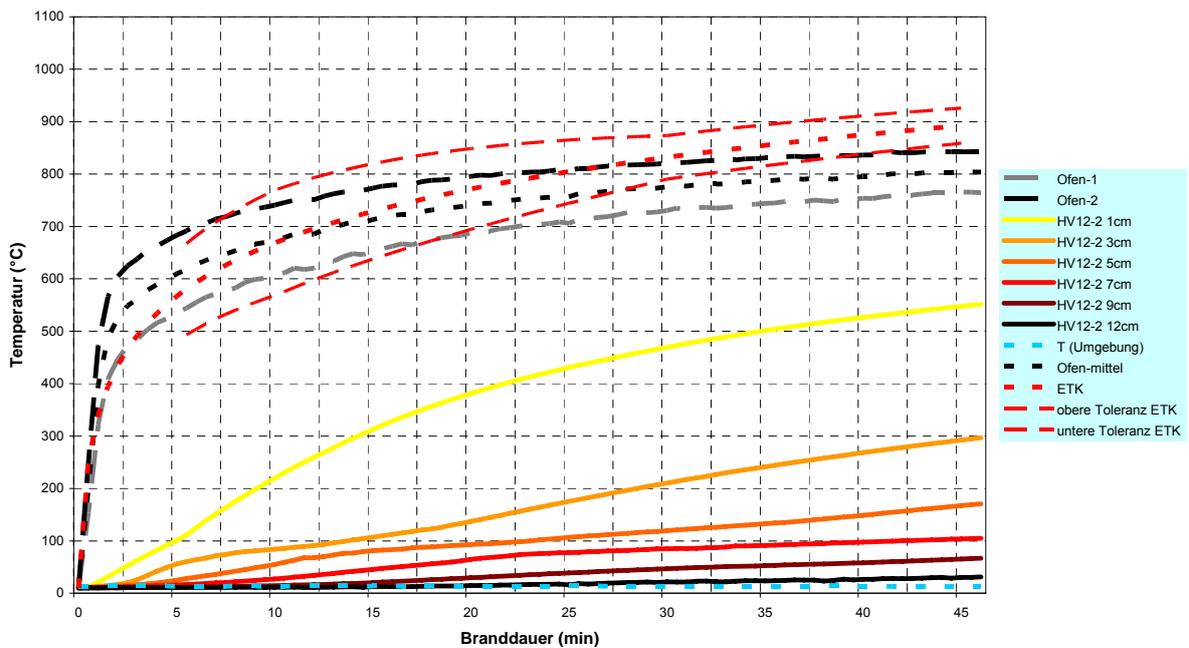


Abbildung 5-5: Temperaturkurve KM-HV12-2 RK01* (Brandversuch 6)

Während Brandversuch 4 lag die vorhandene Brandkurve bis zu Minute 20 im ETK-Toleranzbereich und wurde bis zu Versuchsende bei Minute 45 jedoch um 60 °C überschritten. Im Gegensatz dazu lag die Brandkurve während Brandversuch 6 bis zu Minute 27 innerhalb der ETK-Toleranzkurve. Zu Versuchsende war eine Unterschreitung von ca. 50 °C gegeben.

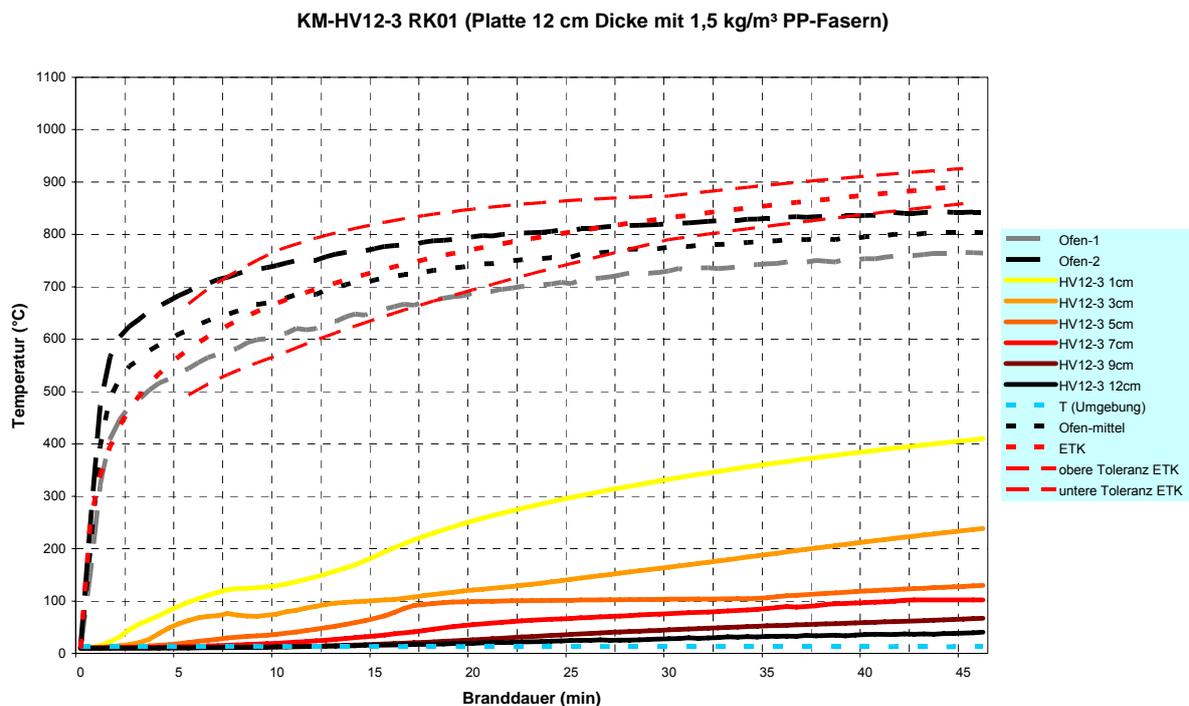


Abbildung 5-6: Temperaturkurve KM-HV12-3 RK01* (Brandversuch 6)

Probekörper KM-HV16 RK01 (Plattendicke 16 cm, mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Ebenso wie KM-HV12-2 RK01* weist auch der Probekörper KM-HV16-1 RK01 bis in eine Tiefe von 7 cm stark erhöhte Temperaturbereiche gegenüber den anderen Serienprüfkörpern auf (Abbildung 5-7). Die kann ebenfalls durch Kontakt zu der Bewehrung begründet sein, der Einfluss von erhöhten Brandkammertemperaturen kann nach Betrachtung von Abbildung 5-18 ausgeschlossen werden, da die mittleren Brandkammertemperaturen während Brandversuch 2 niedriger als jene während Brandversuch 3 waren.

KM-HV16-1 RK01 wurde bei der weiteren Auswertung nicht bei der Errechnung von z.B. Mittelwerten miteinbezogen.

Während der maßgeblichen Brandversuche für die Platten der Dicke 16 cm (Brandversuche 2 und 3) wurde die ETK überschritten (s. Abbildung 5-18).

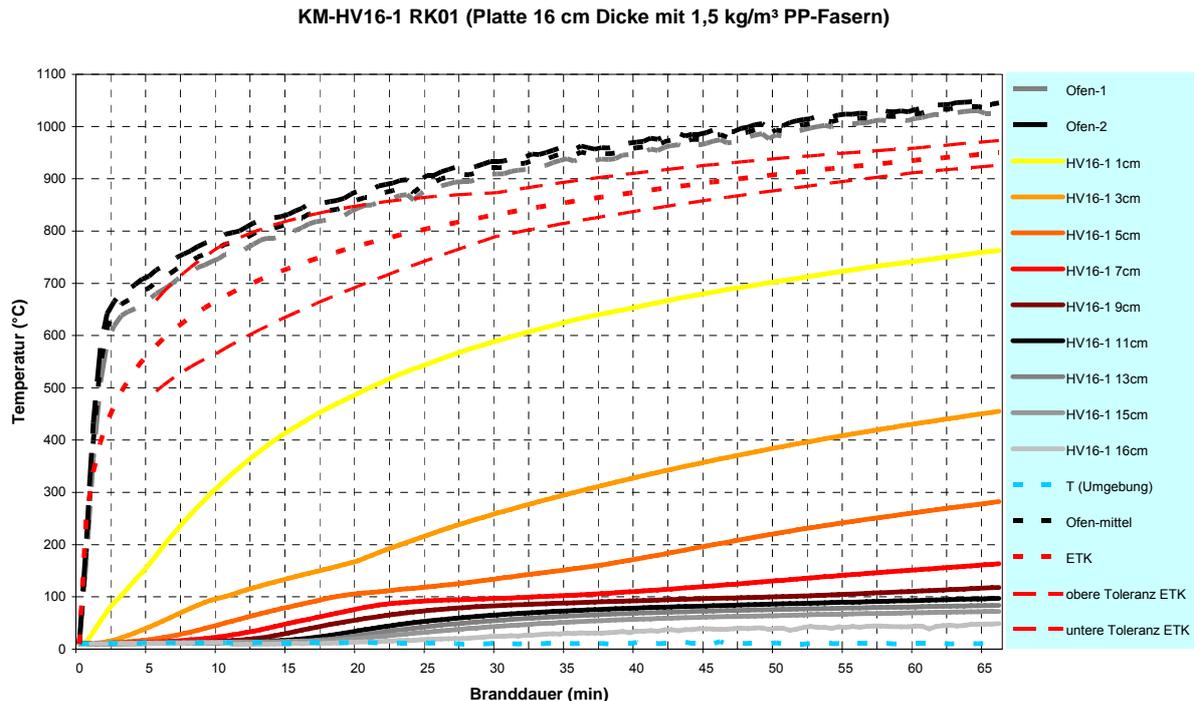


Abbildung 5-7: Temperaturverteilung KM-HV16-1 RK01 (Brandversuch 2)

Nach Betrachtung von Abbildung 5-7, Abbildung 5-8 und Abbildung 5-10 sowie der zugehörigen Messdatentabellen konnte eine, auf den ersten Blick fehlerfreie, Messdatenübertragung bezüglich der Probekörper KM-HV16-1 und KM-HV16-2 festgestellt werden. Lediglich während der ersten sieben Minuten lieferte Platte KM-HV16-3 RK01 keine befriedigenden und teilweise stark alternierende Messwerte, was durch einen Kontaktfehler zu begründen ist. Dieser Umstand hatte auf den Auswertungsprozess jedoch nur vernachlässigbare Auswirkungen.

Der Messkanal von Platte KM-HV16-3 RK01 lieferte in 7 cm Tiefe zwischen Minute 10 und Minute 40 nahezu unveränderte Werte, was auf eine Wasserverdampfung in dieser Tiefe hinweist (s. Abbildung 5-9 auf Seite 78). Die Verdampfung zeigt sich bei Prüfkörper KM-HV16-1 RK01 in der Abbildung 5-7 bei ca. 7 cm und auf Abbildung 5-10 (KM-HV16-3 RK01) ebenfalls bei ca. 7 cm Tiefe, auf Abbildung 5-8 (KM-HV16-2 RK01) bereits bei 5 cm Messtiefe.

Diese Verdampfungsprozesse des Kapillarwassers bei etwa 100 °C wurden auch in den Simulationen wiedergegeben (s. Kapitel 5.6.1.2).

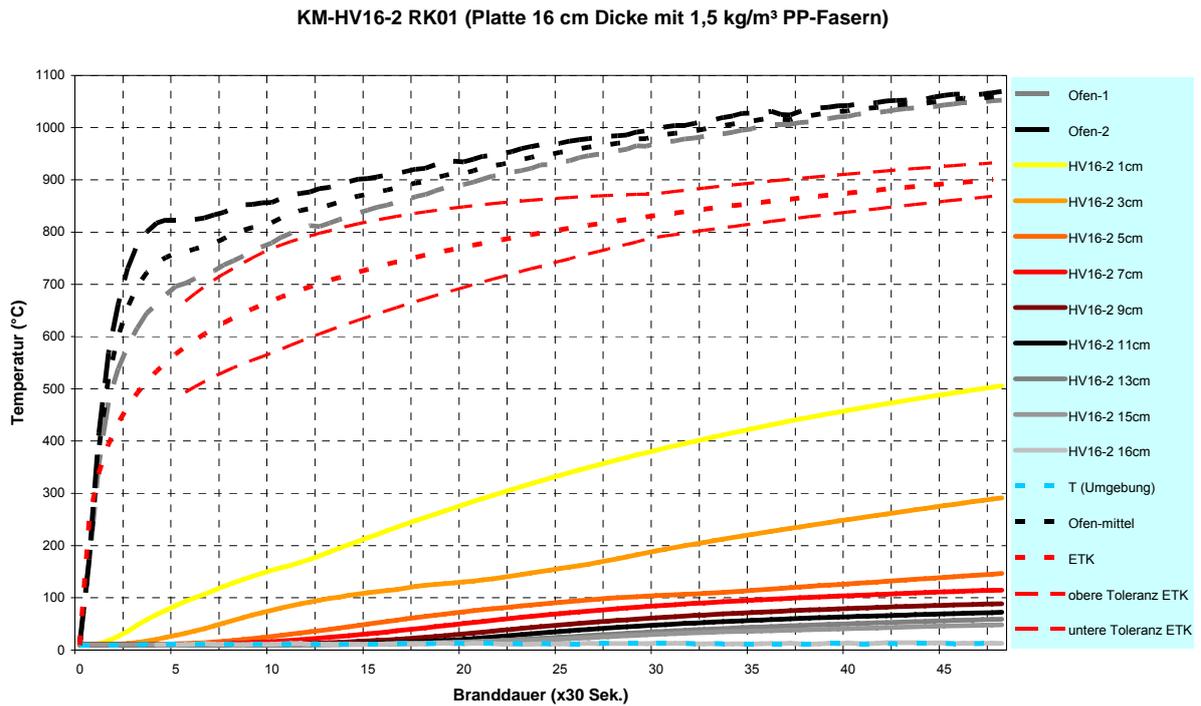
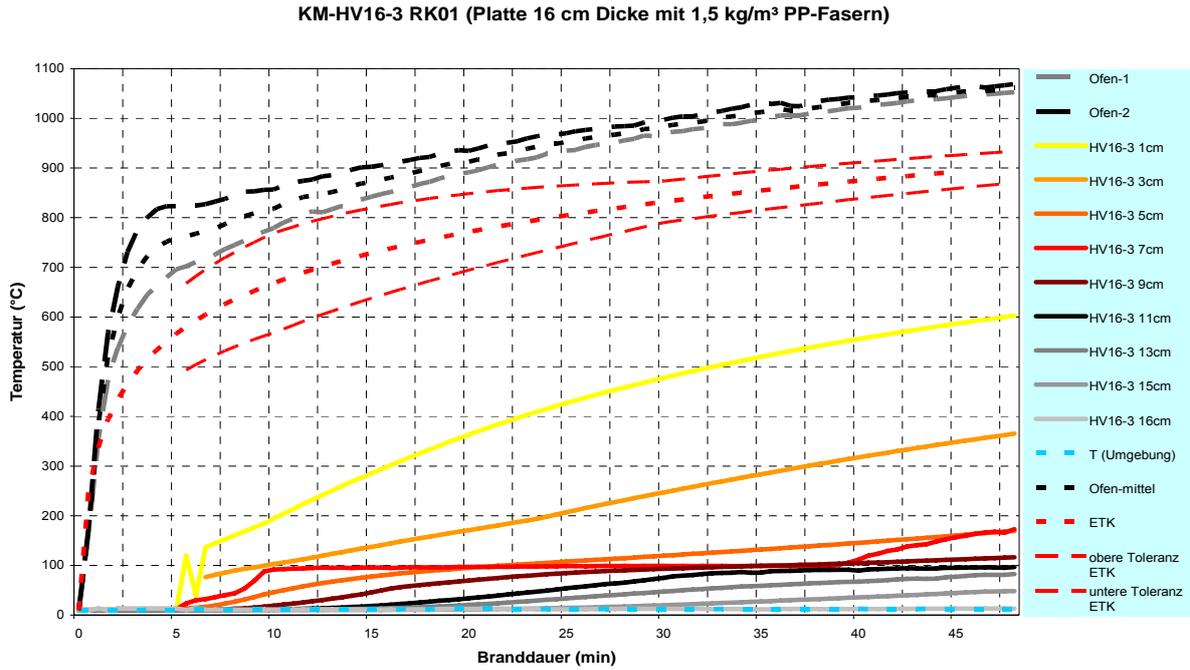


Abbildung 5-8: Temperaturverteilung KM-HV16-2 RK01 (Brandversuch 3)

In Abbildung 5-10 ist in der Messtiefe 7 cm der zuvor bereits erwähnte Einfluss einer massiven Wasserverdampfung bei der Platte KM-HV16-3 RK01 ersichtlich, welcher auch während des Brandversuches 3 dokumentiert wurde (Abbildung 5-9). Ein erhöhter Masseverlust durch den starken Wasseraustritt war im Vergleich mit KM-HV16-2 RK01 jedoch nicht feststellbar (16-3: 2,88 % gegenüber 16-2: 2,80 %). Daraus geht hervor, dass sich das Wasser im Beton im Brandfall u. U. lokal ansammelt und keinesfalls gleichmäßig verteilt ist.

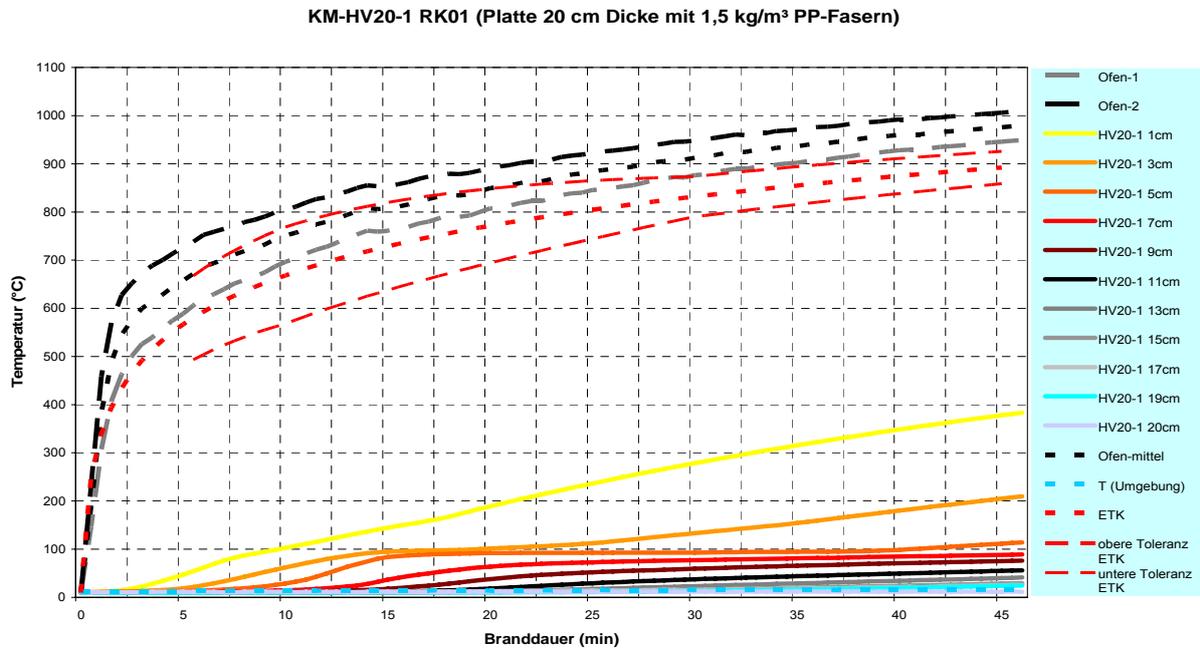


Abbildung 5-9: Wasseraustritt KM-HV16-3 RK01



Probekörper KM-HV20 RK01 (Plattendicke 20 cm, mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Die Prüfkörper der Serie mit 20 cm Dicke, RK01 (Abbildung 5-11 bis Abbildung 5-14), erfuhren nahezu gleiche Ofentemperaturen (s. Brandversuche 4 und 5 in Abbildung 5-18). Der ETK-Toleranzbereich wurde nach 20 bzw. 15 Minuten überschritten.



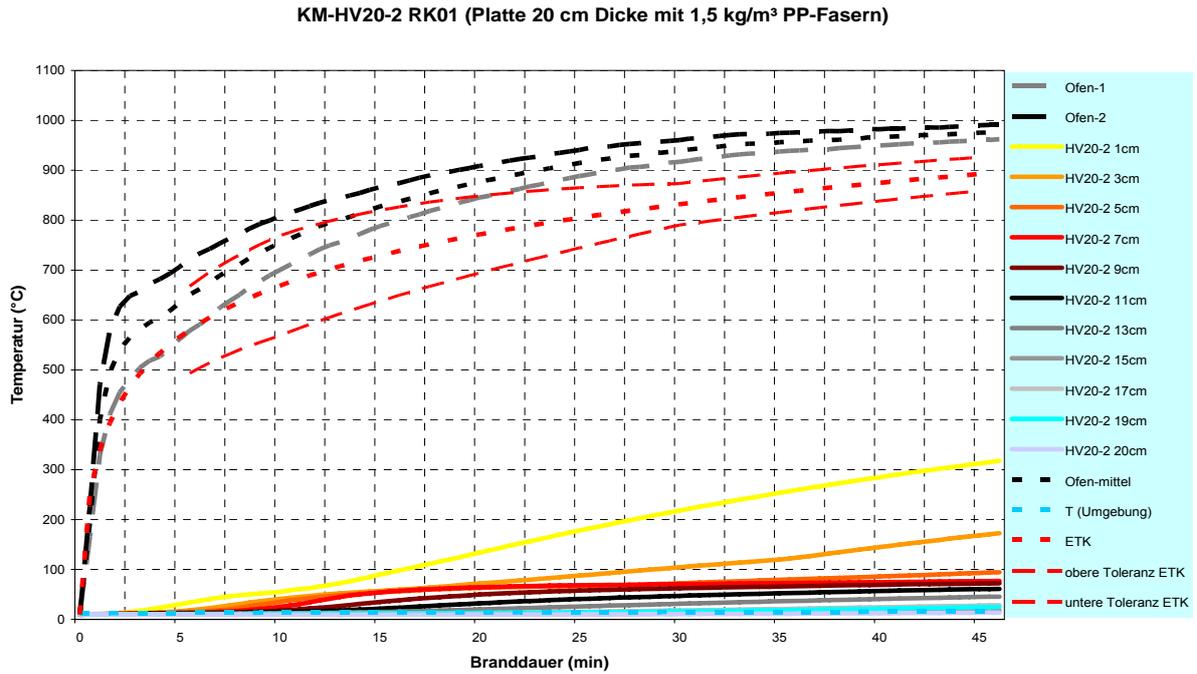


Abbildung 5-12: Temperaturverteilung KM-HV20-2 RK01 (Brandversuch 5)

In Abbildung 5-14 ist der hohe Temperaturbereich des Messdrahtes in 1 cm Bauteiltiefe von KM-HV20-3 RK01 auffällig. Begründbar ist diese Messung mit den erfolgten Abplatzung in Plattenmitte, welche sich im Zeitfenster von ca. 2 Minuten bis 6 Minuten nach Brandversuchsbeginn ereignete (s. Abbildung 5-13).



Abbildung 5-13: Abplatzungen KM-HV20-3 RK01 (während Brandversuch 6)

Im weiteren Verlauf hat diese Abplatzung starke Auswirkungen auf die gemessenen Temperaturen bis in eine Plattentiefe von ungefähr 15 cm, danach sind die Auswirkungen, ob der generell niedrigeren Temperaturen, nur noch minimal.

Die Platte KM-HV20-3 RK01 wurde dadurch in der Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

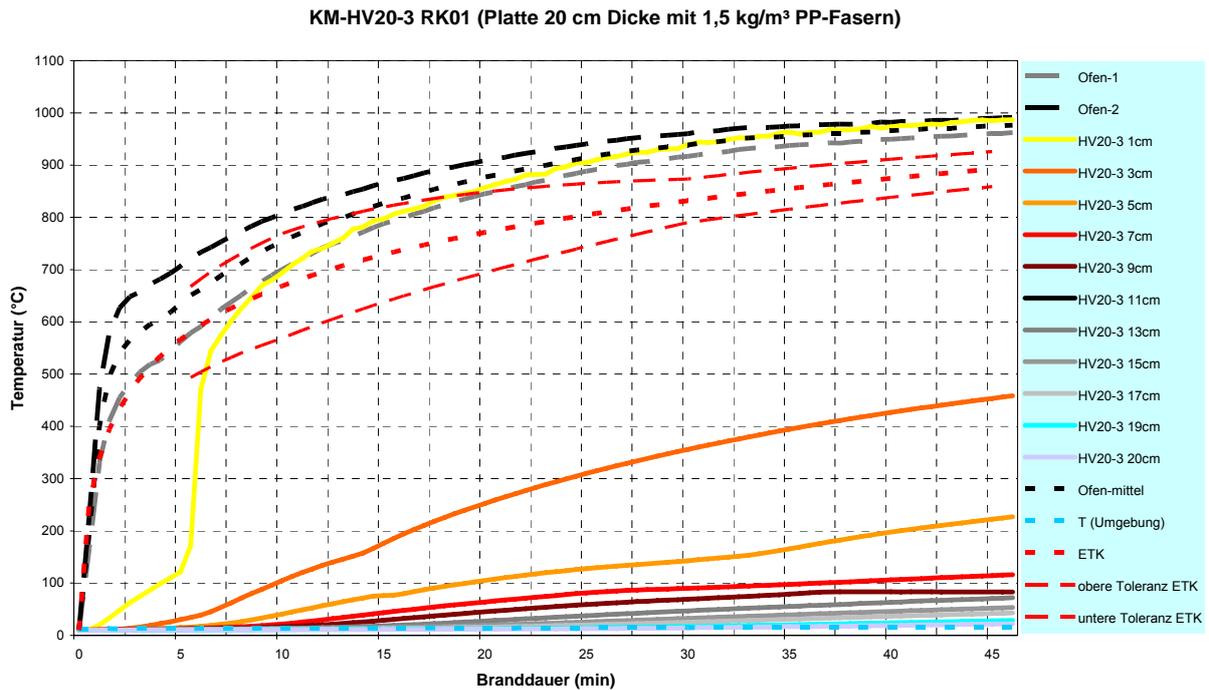


Abbildung 5-14: Temperaturverteilung KM-HV20-3 RK01 (Brandversuch 5)

Der Vergleich der gemessenen Temperaturen in den Probekörpern der Dicke 20 cm mit den Werten der anderen Probeserien (8, 12 und 16 cm) ergibt in allen Messtiefen durchwegs zu niedrigere Werte. Auf Grund der massiven Einflüsse falsch situierter Messdrähte in den Bauteilen ist hier ein Verrutschen der Messbäume während der Probekörperherstellung wahrscheinlich. Das bedeutet, dass die Messdrähte nicht die Temperaturen in den vorgegeben Tiefen 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 und 19 cm darstellen.

Diese Erkenntnis macht die Probekörper der Serie 20 cm, ob der nun unbekanntenen Messtiefen, für die weitere Auswertung unbrauchbar.

Probekörper KM-HV12 RK02 (Plattendicke 12 cm, ohne PP-Fasern)

Die folgenden Temperaturverteilungen wurden an Platten der Mischung RK02 (ohne PP-Fasern) bestimmt. Während der Brandversuche kam es bei allen drei Platten zu Abplatzungen.

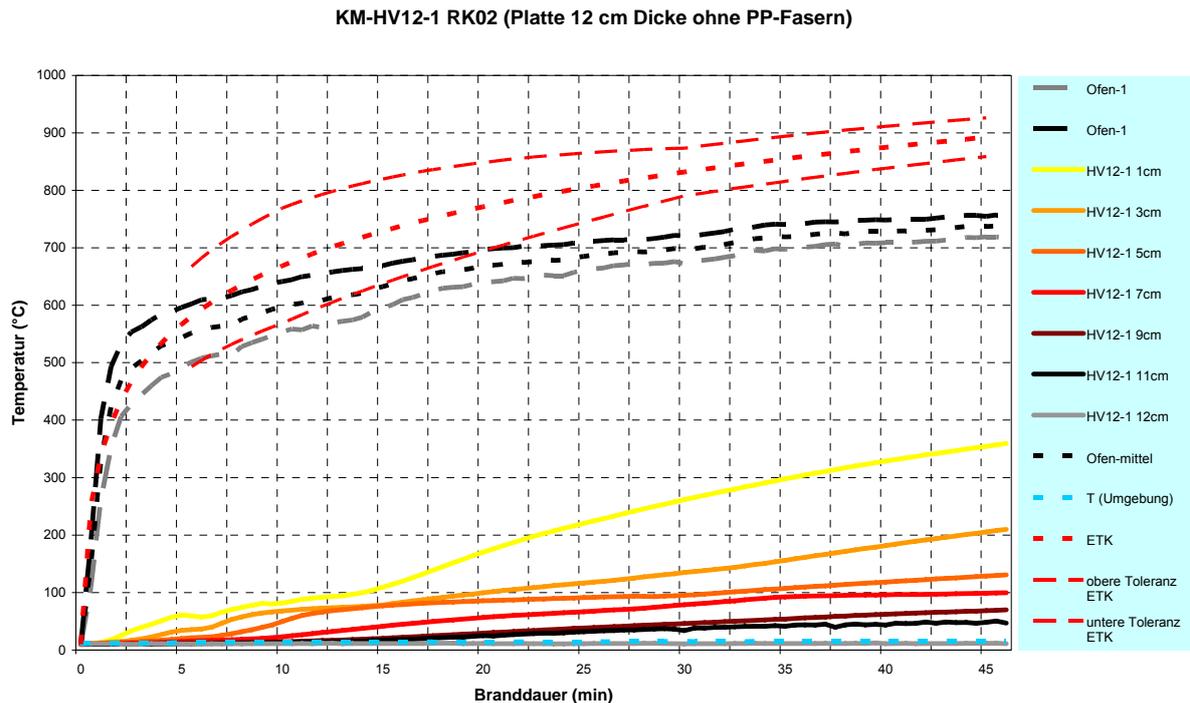


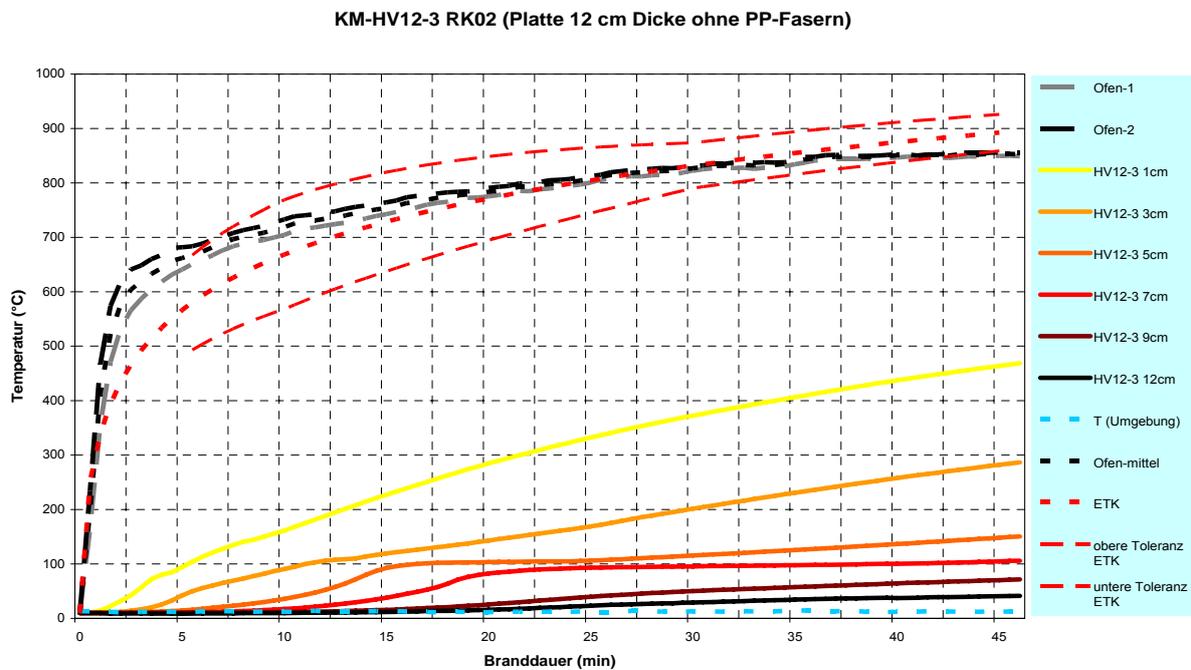
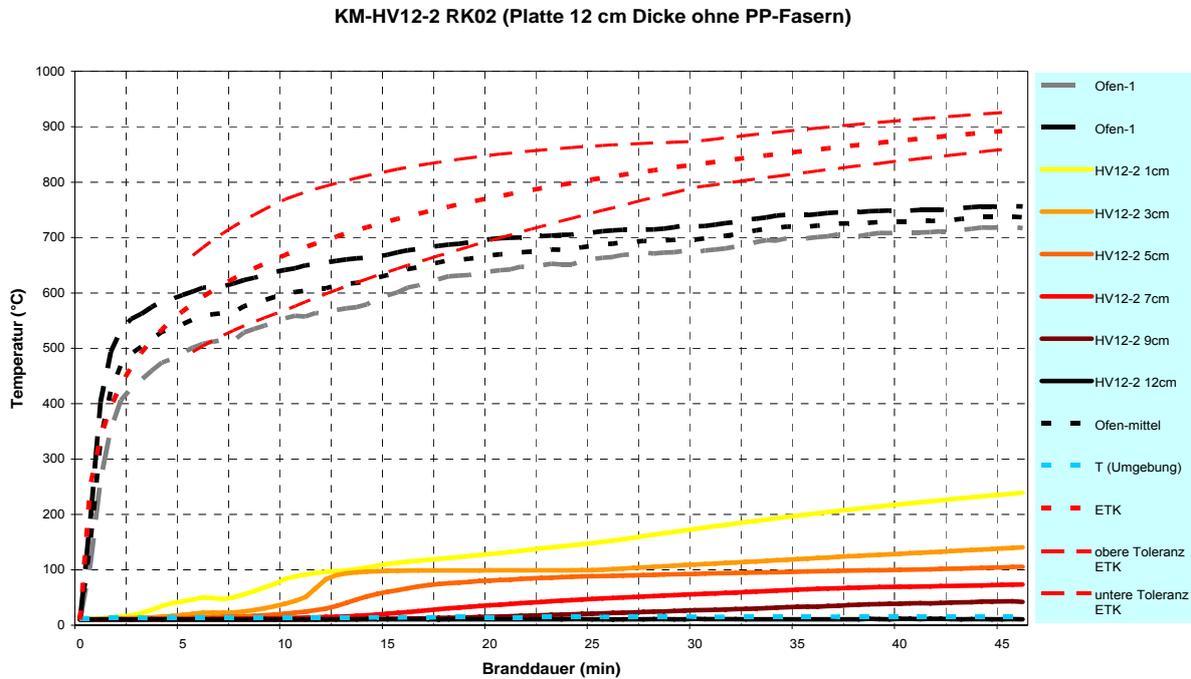
Abbildung 5-15: Temperaturverlauf KM-HV12-1 RK02 (Brandversuch 7)

Bei Betrachtung der Abbildung 5-15 bis Abbildung 5-17 konnten keine Datenübertragungsfehler festgestellt werden. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass die in der Platte KM-HV12-2 RK02 gemessenen Temperaturen ab Minute 17 deutlich unter jenen der Platten KM-HV12-1 RK02 und KM-HV12-3 RK02 liegen. Dies ist jedoch unter Betrachtung der maßgeblichen mittleren Brandkammertemperaturkurven nicht begründbar, weshalb hier ein Messfehler vorliegen muss. Das Verrutschen des Thermoelements während der Prüfkörperherstellung stellt eine mögliche Ursache für diesen Umstand dar. Im späteren Verlauf dieser Arbeit wird dies zu einer Nichtberücksichtigung der Messdaten von KM-HV12-2 RK02 bei der Prüfserienmittelwertbildung führen.

Abbildung 5-18 zeigt deutlich die geringe Übereinstimmung der beiden Brandkammertemperaturkurven der Brandversuche 7 bzw. 8 – die ETK wurde in Brandversuch 7 überschritten, während die mittlere Ofentemperatur bei Brandversuch 8 zwischen Minute 7 und 42 innerhalb des Toleranzbereiches der ETK gemäß ÖNORM EN 1363-1 liegt. Wie auch während der Brandversuche 1 bis 6 wurden die Bedingungen (Außentemperaturen), der verwendete Brenner, die Brandkammer und auch die manuelle Regelung nicht verändert, weshalb die großen Unterschiede in den gemessenen Brandkurven nicht erklärbar sind. Einzig eine Veränderung der Luftzufuhr des Brenners ist

denkbar. Der Brenner wurde zwischen den Brandversuchen anderweitig verwendet, so dass die Brennerdüse eventuell verstellt war.

Eine genaue Überprüfung dieses Umstandes war jedoch nicht möglich, da die Kontrolle der Brennereinstellungen nicht möglich war.



5.3 Brandkammertemperaturen

Die angestrebte Einheitstemperaturkurve (ETK) wurde in allen 8 Hauptbrandversuchen über- bzw. unterschritten (s. Abbildung 5-18). Eine manuelle Reduktion der Brennertemperatur mittels der Handsteuerung war nicht möglich, auch eine Erhöhung der Luftzufuhr zum Zwecke einer Brennertemperaturverringering durch einen Servicemitarbeiter der Fa. *Olymp*, während Brandversuch 4, brachte nicht die gewünschten Ergebnisse.

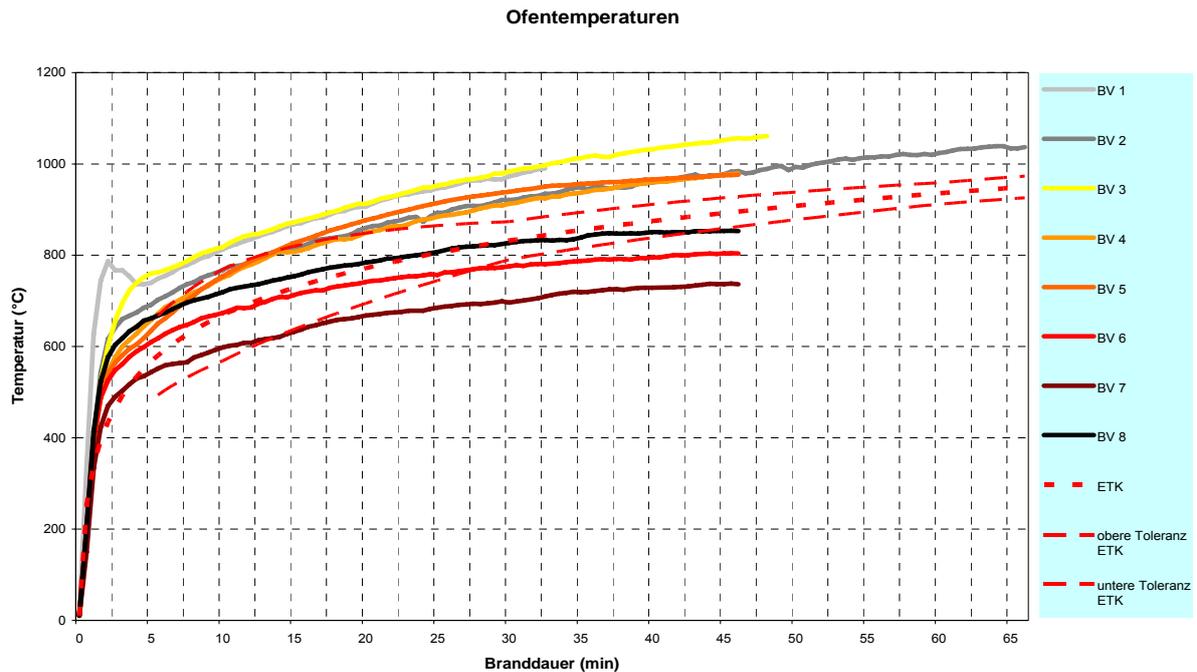


Abbildung 5-18: Brandkammertemperaturen während der Versuche (inkl. ETK und KC-Kurve)

Die Messung der Temperaturen (Lage ca. 10 cm unterhalb der Bauteiloberfläche) erfolgte mittels NiCr-Ni-Mantelthermoelementen. Plattenthermoelemente gemäß ÖNORM EN 1363-1 standen während der Brandversuche nicht zur Verfügung.

5.4 Sonstige Beobachtungen

Nach den Brandversuchen wurde jede der brandgeprüften Betonplatten photodokumentiert. Dabei wurde festgestellt, dass sämtliche Betonplatten mit den Betonrezepturen RK01 und RK01* massive Oberflächenfestigkeitsverluste der dehydrierten Betonschichten, beginnend schon ungefähr 30 Minuten nach Beendigung des betreffenden Brandversuches, aufwiesen. Ein Abschlagen des dehydrierten Betons war dabei nicht nötig (Abbildung 5-20 bis Abbildung 5-22). Betonplatten der Betonrezeptur RK02 wiesen selbst neun Wochen nach den

Brandversuchen noch keine sichtbaren Beeinträchtigungen auf (Abbildung 5-23 bis Abbildung 5-25). Abbildung 5-19 zeigt die Zermürbungstiefe von Normalbeton in Abhängigkeit der Branddauer bei einseitiger ETK-Temperaturbeanspruchung nach *Kordina, Meyer-Ottens*, S.207/[20].

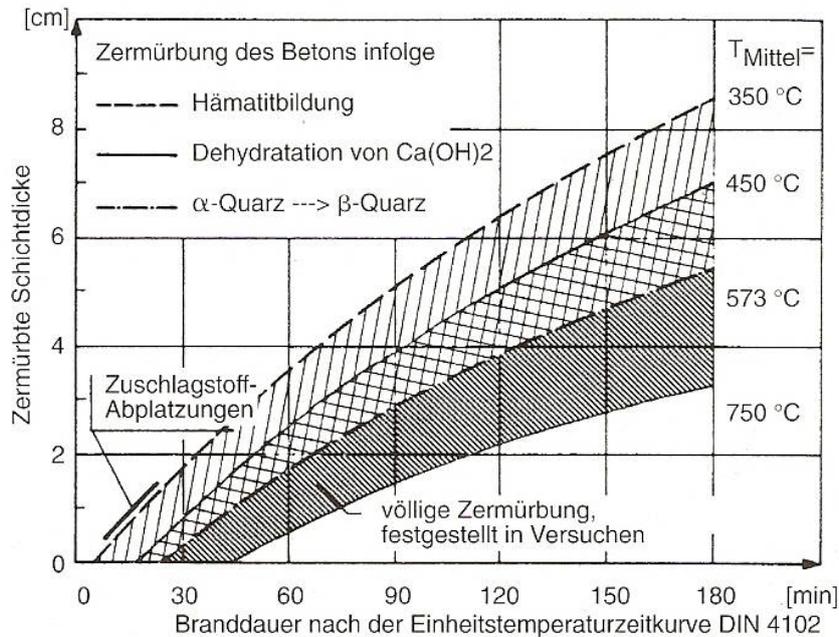


Abbildung 5-19: Zermürbungstiefe (*Kordina, Meyer-Ottens*, S.207/[20])

Nach Abbildung 5-19 treten bei ETK-Temperaturbeanspruchung nach einer Branddauer von 90 min Zermürbungserscheinungen bei einer mittleren Bauteiltemperatur in der Tiefe 4 cm von $T_{\text{Mittel}} = 450 \text{ °C}$ auf. Der Beginn der völligen Zermürbung setzt bei $T_{\text{Mittel}} = 573 \text{ °C}$ in 3 cm Bauteiltiefe ein. Eine völlige Zermürbung tritt bei Temperaturen über 573 °C auf und ist bei einer Branddauer von 90 Minuten bis zu einer Tiefe von 2 cm festzustellen.

Bei den zu dieser Arbeit zugehörigen Versuchen betrug die Branddauer zwischen 35 und 65 Minuten. Gemäß [20] waren daher Zermürbungsschichtstärken von 0,25 bis 1,5 cm zu erwarten. Die beobachteten Dicken der dehydrierten Schichten der Probekörper mit PP-Fasern lagen allesamt in der Größenordnung zwischen 0,5 bis ca. 1,0 cm und korrespondieren daher offensichtlich mit den Angaben nach *Kordina, Meyer-Ottens*, S.207/[20].



Abbildung 5-20: KM-HV16-1 RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern; 2 Minuten nach dem Brandversuch)



Abbildung 5-21: KM-HV16-1 RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern; 1 Stunde nach dem Brandversuch)



Abbildung 5-22: KM-HV16-1 RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern; 1 Tag nach dem Brandversuch)



Abbildung 5-23: KM-HV12-1 RK02 (ohne PP-Fasern; 2 Minuten nach dem Brandversuch)



Abbildung 5-24: KM-HV12-1 RK02 (ohne PP-Fasern; 1 Tag nach dem Brandversuch)



Abbildung 5-25: KM-HV12-1 RK02 (ohne PP-Fasern; 3 Tage nach dem Brandversuch)

5.5 Versuchsauswertung

Ziel dieser Diplomarbeit war es, etwaige Zusammenhänge zwischen der Temperatureindringtiefe und der Plattendicke von Betonbauteilen zu untersuchen. In der vorhandenen Literatur finden sich zu dieser Thematik lediglich Temperaturverläufe von Platten der Dicke 10 und 14 cm (*Kordina, Meyer-Ottens, S.66ff/[20]*). Ein Vergleich der Temperaturverläufe verschieden dicker Betonplatten wurde nicht gefunden.

Ausgehend von den Rohdaten (geliefert von den einbetonierten Thermoelementen während der Brandversuche) sollen nun Zusammenhänge bzw. Unterschiede zwischen den Temperaturverteilungen der 15 geprüften Betonkörper (entspricht 5 Prüfkörperserien der Dicken 8 cm RK01, 12 cm RK01, 16 cm RK01, 20 cm RK01 und 12 cm RK02) aufgezeigt werden.

Auf Grund der differierenden Brandkurven (s. Kapitel 5.3) wird auf einen direkten Vergleich der Messdaten der verschiedenen Probekörper verzichtet und im Folgenden eine Darstellung der Mittelwerte der Prüfkörperserien KM-HV8 RK01 (Platten mit 8 cm Dicke und 1,5 kg/m³ PP-Faseranteil), KM-HV12 RK01* (Platten mit 12 cm Dicke und 1,5 kg/m³ PP-Faseranteil), KM-HV16 RK01 (Platten mit 16 cm Dicke und 1,5 kg/m³ PP-Faseranteil) und KM-HV12 RK02 (Platten mit 8 cm Dicke ohne PP-Fasern) gewählt. Die Möglichkeit der direkten Vergleichbarkeit ist nur zwischen den 8 und 16 cm dicken Platten gegeben, da die gemessenen Brandkurven der übrigen Prüfserien zu weit abweichen (s. 5.5.2).

5.5.1 Gemittelte Temperaturverläufe je Prüfserie

Die Vorgangsweise dabei enthielt eine Eliminierung von verfälschend wirkenden, aber nicht nur offensichtlich falschen Messergebnissen. Die Beschreibung der jeweiligen Messfehler ist in Kapitel 5.2 bei den betreffenden Probekörpern angeführten.

Die Abbildung 5-26 bis Abbildung 5-29 stellen die gemittelten Temperaturverläufe der Prüfserien KM-HV8 RK01, KM-HV12 RK01*, KM-HV16 RK01 und KM-HV20 RK02 dar.

Probekörperserie KM-HV8 RK01 (Plattendicke 8 cm, mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Die Prüfserie HV8 RK01 weist dabei in der Messtiefe 3 cm auf Grund von Kontaktfehlern bei der Messwertübertragung ab Minute 32,5 keine verwendbaren Temperaturdaten auf (Abbildung 5-26). Die mittlere Brandkammertemperatur überschreitet die Einheitstemperaturkurve (inkl. deren Toleranzen) während der gesamten Brandversuchsdauer. Der Sprung bei Minute 32,5 ist dadurch zu begründen, dass nur eine der drei Platten dieser Serie 65 Minuten lang befeuert wurde und die gemessenen Temperaturwerte von Platte KM-HV8-3 nun ab Minute 32,5 direkt in die Darstellung eingehen.

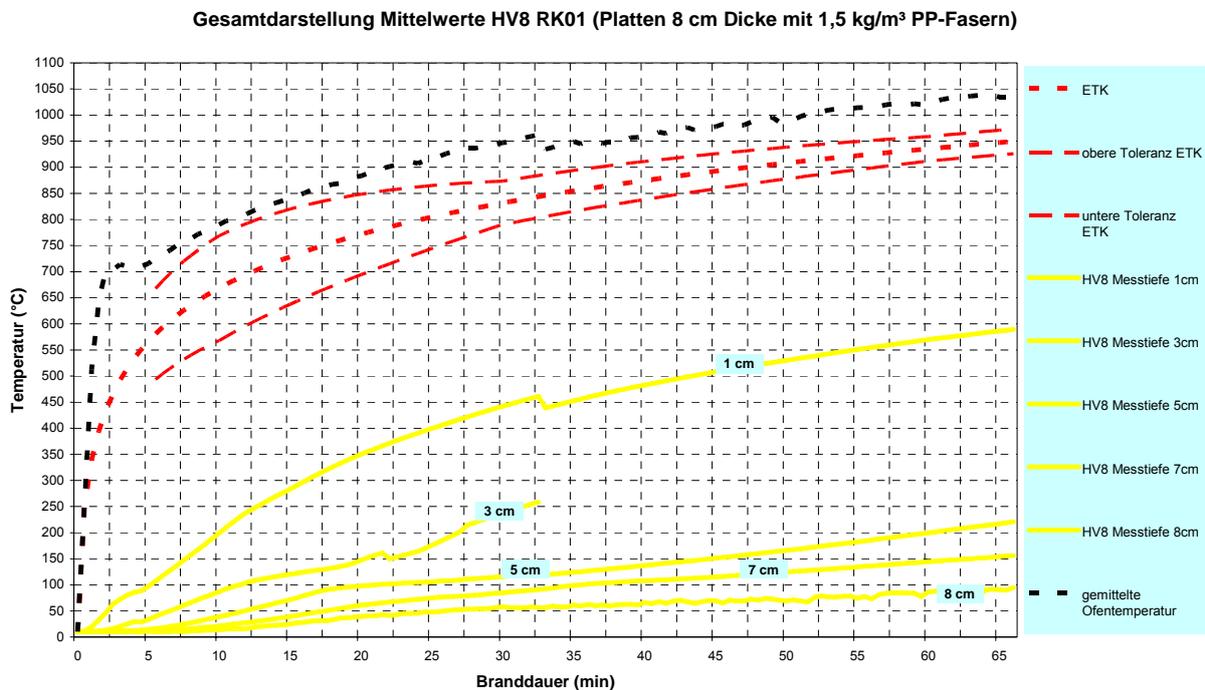


Abbildung 5-26: Gemittelte Temperaturverläufe bei Plattendicke 8 cm RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Probekörperserie KM-HV12 RK01 (Plattendicke 12 cm, mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Die Prüfserie HV12 RK01 in Abbildung 5-27 liefert ähnliche Temperaturverläufe zu jenen der Prüfserie HV8 RK01, jedoch mit einer durchgehenden Tendenz die Werte der Serie KM-HV8 RK01 minimal zu unterschreiten, was auf die niedrigere Brandtemperatur zurückzuführen ist. Auffällig ist, dass die Differenz ab einer Tiefe von 5 cm nur mehr verschwindend klein ist.

Die gemittelte Brandkammertemperatur liegt während der gesamten Brandversuchsdauer in den ETK-Toleranzbereichen gemäß ÖNORM EN 1363-1.

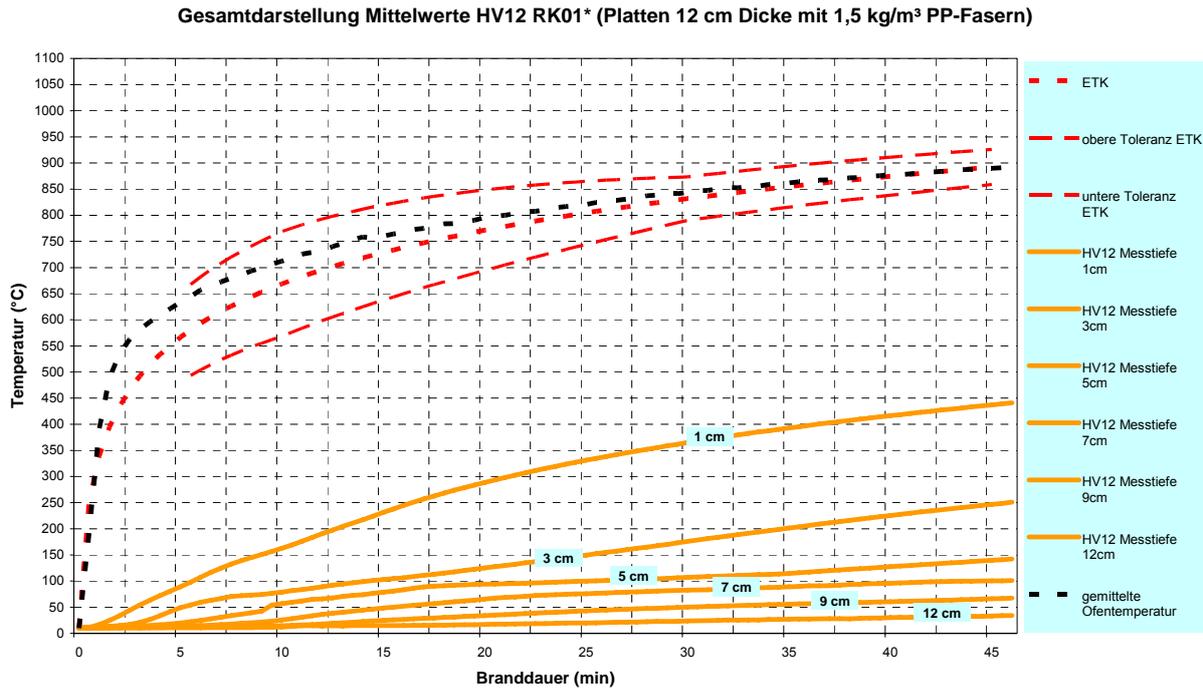


Abbildung 5-27: Gemittelte Temperaturverläufe bei Plattendicke 12 cm RK01* (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Probekörperserie KM-HV16 RK01 (Plattendicke 16 cm, mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Die mittlere Temperaturbeanspruchung der Probekörper mit 16 cm Dicke sind bei Vergleich mit jenen der 8 cm dicken Probekörper nahezu deckungsgleich (s. auch Abbildung 5-30).

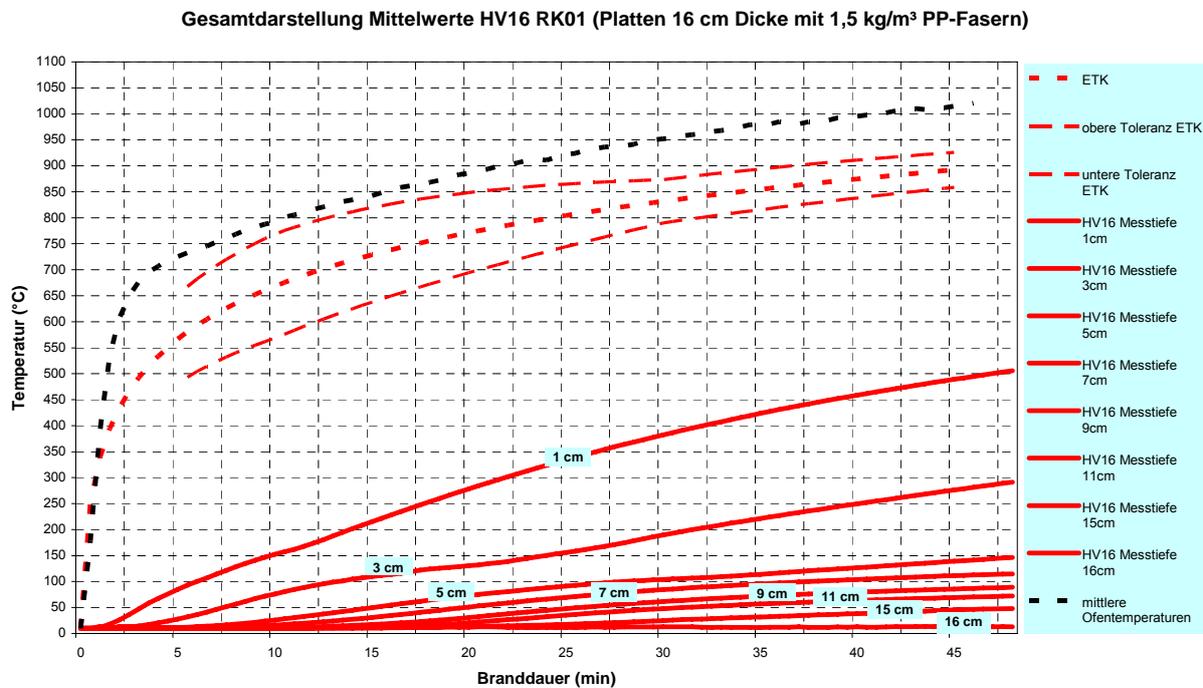


Abbildung 5-28: Gemittelte Temperaturverläufe bei Plattendicke 16 cm RK01 (mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern)

Abbildung 5-28 zeigt eine Überschreitung der angestrebten Einheitstemperaturkurve um bis zu 124°C bei Minute 45 des Brandversuches. Nach 45 Minuten beträgt die Temperatur in Messtiefe 1 cm 489 °C. Dies entspricht in etwa der Vergleichstemperatur der Serie KM-HV8, wo bei einer vergleichbaren Brandkurve nach 45 Minuten 508 °C gemessen wurden.

Probekörperserie KM-HV12 RK02 (Plattendicke 12 cm, ohne PP-Fasern)

Die Probekörper der Serie KM-HV12 RK02 erfuhren während der Brandversuche allesamt nach nur wenigen Minuten Abplatzungen. Diese Abplatzungen sind auf das Fehlen von PP-Fasern zurückzuführen und ereigneten sich nicht in Plattenmitte, wodurch die Beeinflussung der Temperaturen im Nahbereich der Messdrähte in den in Feldmitte einbetonierten Betonthermoelementen nur minimal ist. Dies spiegelt sich auch in Abbildung 5-29 wider, da in Messtiefe 1 cm kein auffälliger Temperaturanstieg ab dem Zeitpunkt der Abplatzungen nach ca. 4 Minuten ablesbar ist.

Die Einheitstemperaturkurve wurde von der mittleren Brandkammerkurve zu Versuchsbeginn überschritten um nach dem Verlauf innerhalb des Toleranzbereichs die untere ETK-Toleranzkurve ab Minute 26 zu unterschreiten. Die Temperaturen in 1 cm Messtiefe nach 45 Minuten sind im Vergleich zu KM-HV8 (s. Abbildung 5-26) und KM-HV16 (s. Abbildung 5-28) mit einem Mittelwert von 409 °C bedingt durch die niedrigere Brandkurve erwartungsgemäß niedriger.

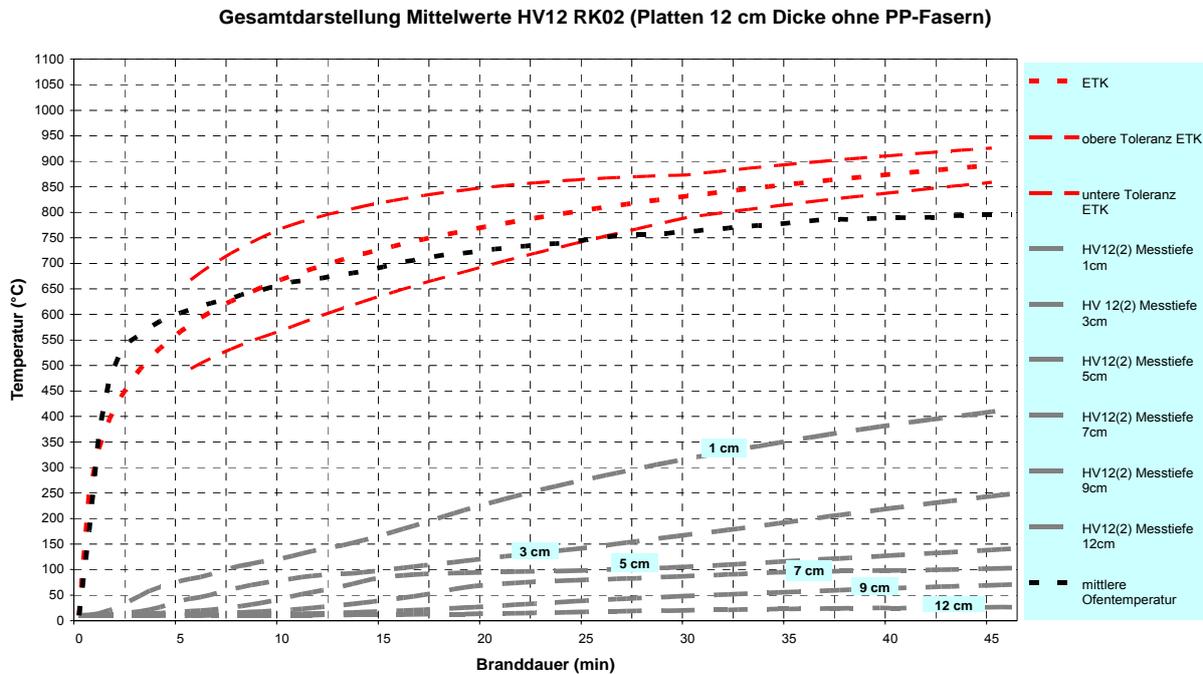


Abbildung 5-29: Gemittelte Temperaturverläufe bei Plattendicke 12 cm RK02 (ohne PP-Fasern)

5.5.2 Mittlere Brandkammertemperaturen der Prüfserien

Erst die Untersuchung der mittleren Brandkammertemperaturen ermöglicht die korrekte Vergleichbarkeit der Temperaturkurven der verschiedenen Probekörperserien. Auf Grund der verschiedenen Brandkurven wird in Abbildung 5-30 ersichtlich, dass lediglich die Temperaturkurven der Serien KM-HV8 RK01 (8 cm Plattendicke, 1,5 kg/m³ PP-Fasern) und KM-HV16 RK01 (16 cm Plattendicke, 1,5 kg/m³ PP-Fasern) direkt miteinander vergleichbar sind.

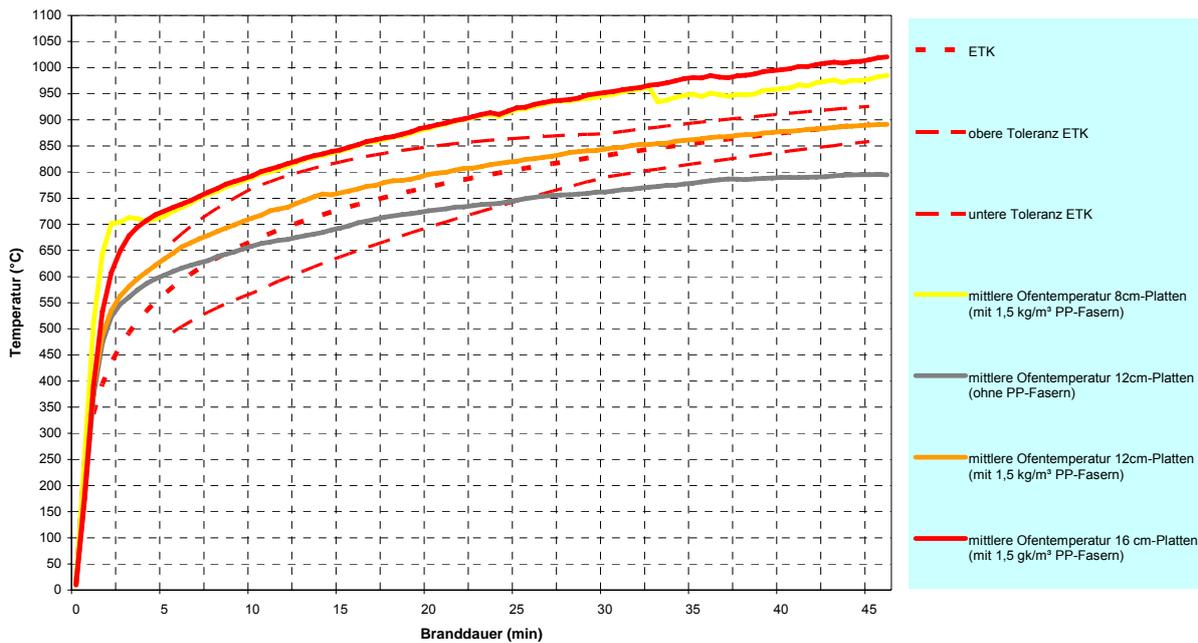


Abbildung 5-30: Mittlere Brandkammertemperaturen der Serien

5.5.3 Vergleich der mittleren Temperaturkurven

Die Einhaltung vergleichbarer Rahmenbedingungen während der Brandversuchsanordnungen stellt zweifellos den Ausgangspunkt zum Erhalt seriöser und aussagekräftiger Ergebnisse aus gemessenen Versuchsdaten dar. Für die Brandversuche im Zuge der gegenständlichen Arbeit bedeutet das eine Vergleichbarkeit der Temperaturkurven von nur jenen Probekörpern, welche auch mit einer vergleichbaren Brandkurve befeuert wurden. Abbildung 5-30 weist daher eine Vergleichbarkeit der Probekörper mit 8 bzw. 16 cm Bauteildicke und einem PP-Fasergehalt von jeweils 1,5 kg/m³ aus. Abbildung 5-31 zeigt den Vergleich der Temperaturkurven dieser beiden Prüfserien, aufgeschlüsselt nach der Messtiefe. Bis zu einer Messtiefe von 5 cm weist die 8 cm dicke

Platte höhere Temperaturen als die 16 cm dicke Vergleichsplatte auf. Ab einer Tiefe von 7 cm macht sich nach etwa 25 – 30 Minuten der Einfluss der durch die Umgebungsluft (Lufttemperatur ca. 10 °C) „gekühlten“, der Brandkammer abgewandten Oberfläche der Platte bemerkbar.

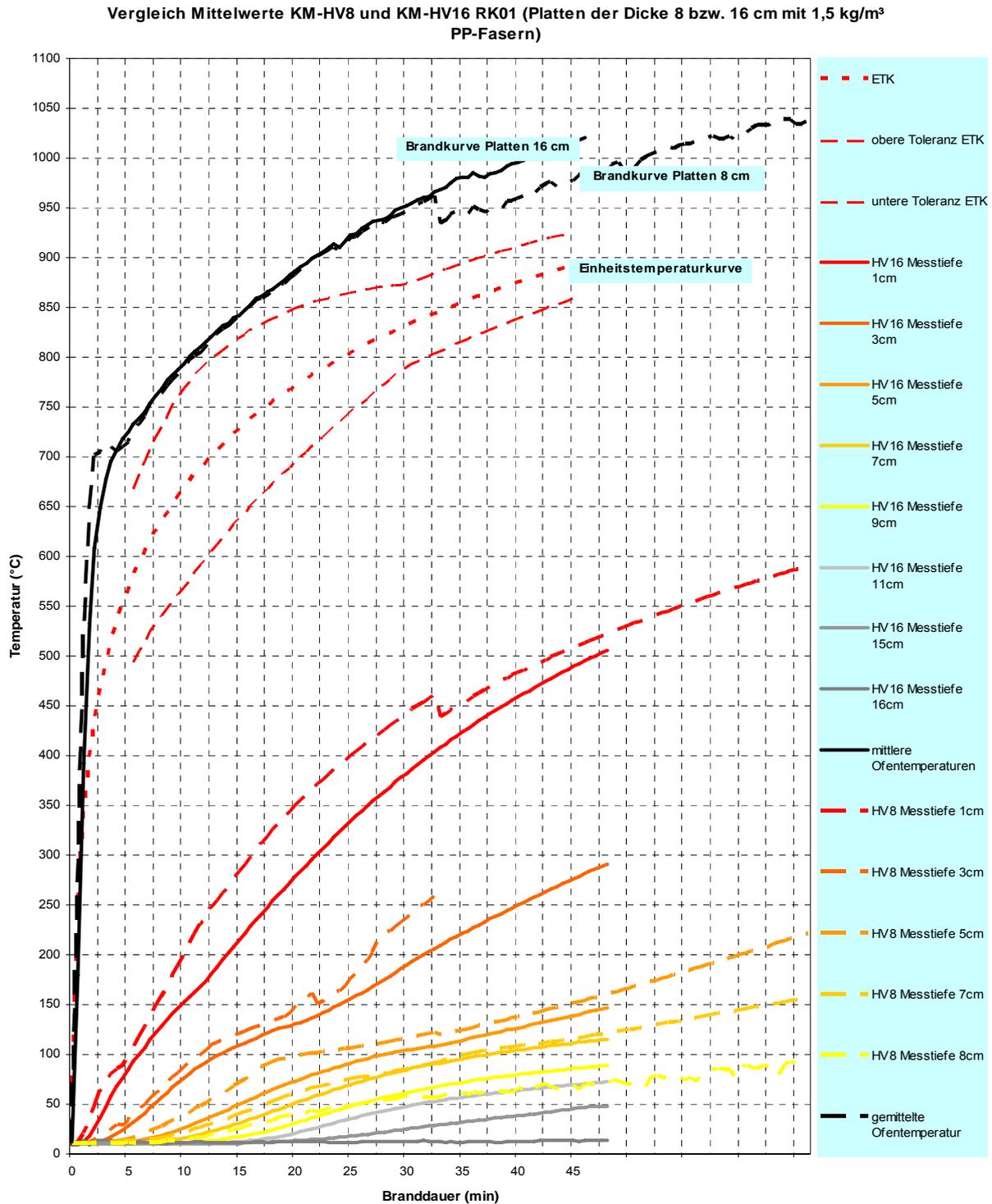


Abbildung 5-31: Vergleich der gemittelten Temperaturkurven von Prüfkörpern der Dicken 8 bzw. 16 cm nach der gemessenen Brandkurve

5.5.4 Temperaturverteilungen in Abhängigkeit der Branddauer

Abbildung 5-32 bis Abbildung 5-35 zeigen die Temperaturverteilungen in den Prüfserien KM-HV8 RK01 (8 cm dicke Platten mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern), KM-HV12 RK01* (12 cm dicke Platten mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern), KM-HV16 RK01 (16 cm dicke Platten mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern) und KM-HV12 RK02 (12 cm dicke Platten ohne PP-Fasern) in Abhängigkeit der Branddauer. Die zu der jeweiligen Prüfserie zuordenbare Brandkurve ist Abbildung 5-30 zu entnehmen.

In Abbildung 5-32 ist die Auswirkung fehlender Messdaten in der Prüfserie KM-HV8 in 3 cm Messtiefe ab Minute 35 der Brandversuche sichtbar. Eine direkte Vergleichbarkeit ist wieder nur mit der Prüfserie KM-HV16 (Abbildung 5-34) zulässig. Grund dafür ist wie in Kapitel 5.5.2 die nahezu deckungsgleiche, und somit vergleichbare, Brandbelastungskurve.

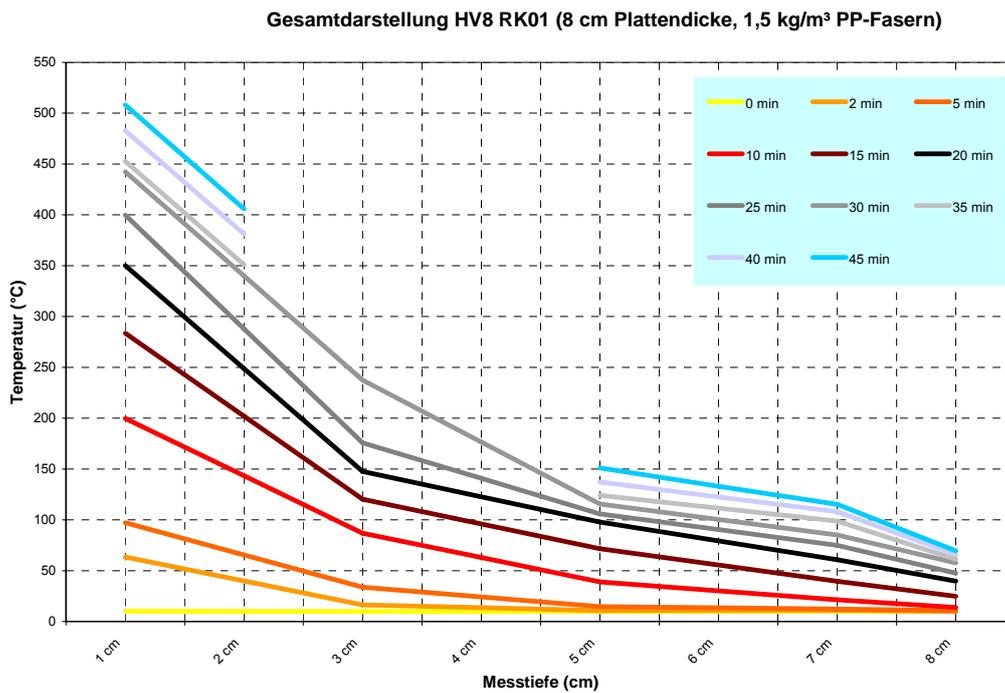


Abbildung 5-32: Branddauerabhängige Temperaturverteilung in 8 cm dicken Platten RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

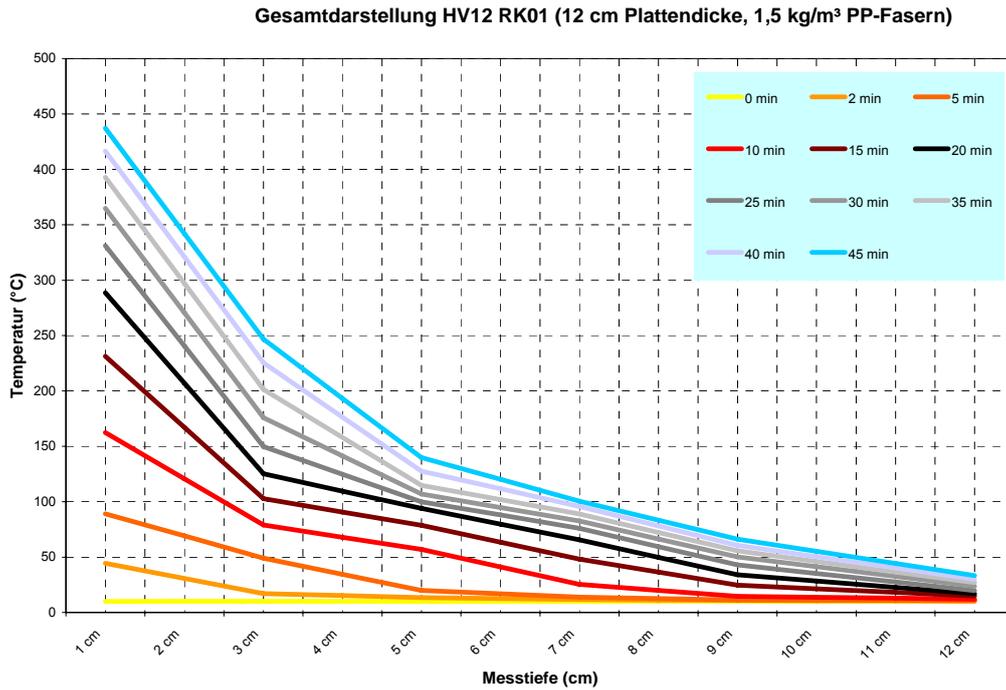


Abbildung 5-33: Branddauerabhängige Temperaturverteilung in 12 cm dicken Platten RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

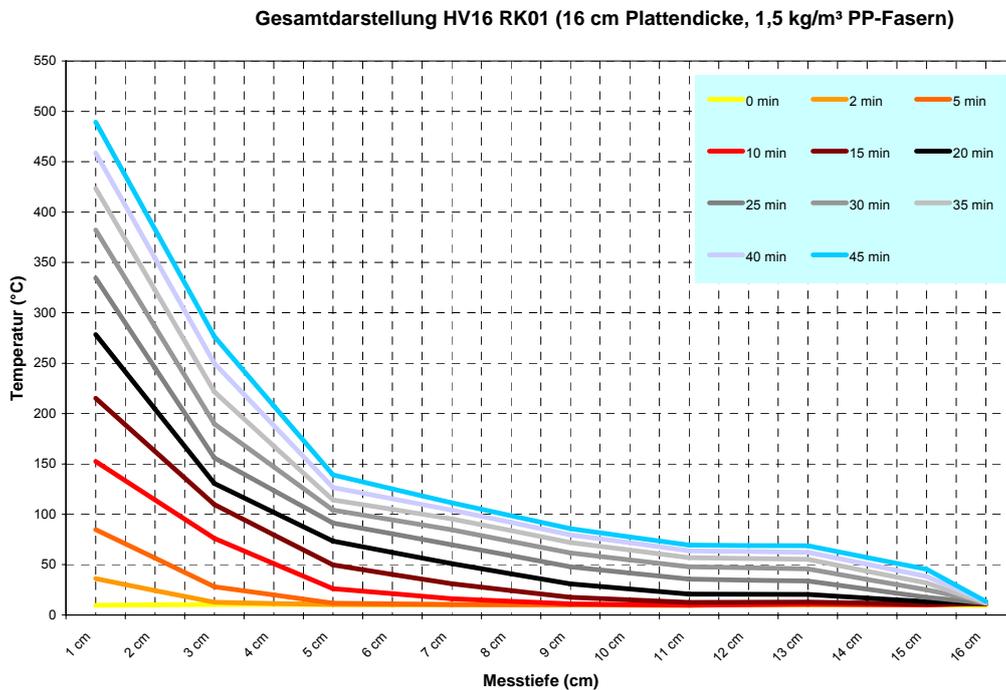


Abbildung 5-34: Branddauerabhängige Temperaturverteilung in 16 cm dicken Platten RK01 (1,5 kg/m³ PP-Fasern)

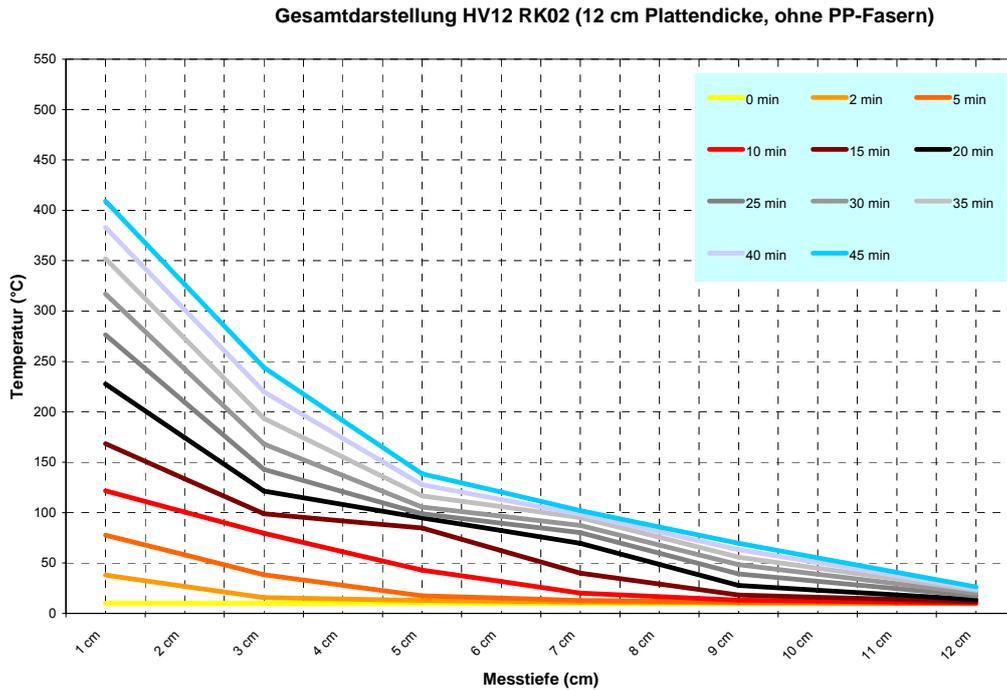


Abbildung 5-35: Branddauerabhängige Temperaturverteilung in 12 cm dicken Platten RK02 (ohne PP-Fasern)

Abbildung 5-36 zeigt in einer zusammenfassende Darstellung die Auswertungsergebnisse der Serien KM-HV8 und KM-HV16, unterschieden nach verschiedenen Branddauern.

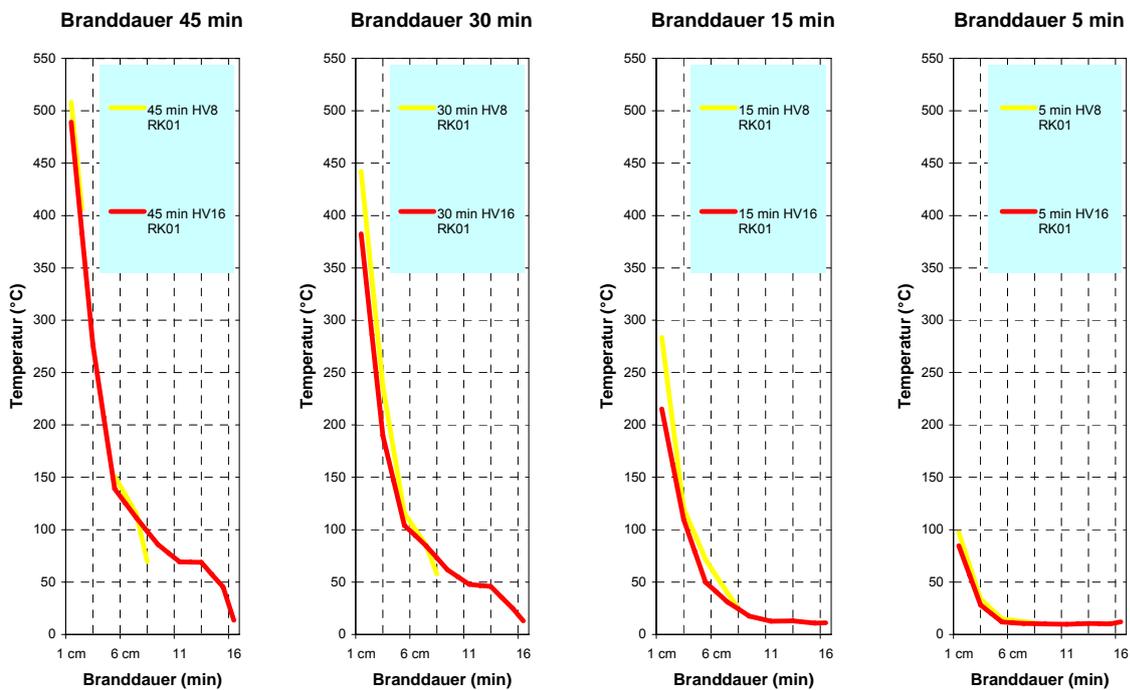


Abbildung 5-36: Gemessene Temperaturverteilungen in 8 cm bzw. 16 cm dicken Platten ($1,5 \text{ kg/m}^3$ PP-Fasern)

5.6 Temperatursimulationen und –berechnungen

5.6.1 Simulation mittels der Berechnungssoftware *MRFC Version 2.5*

Die Brandsimulationssoftware *MRFC* (Multi-Room-Fire-Code) [29] wurde von der *Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit* an der Technischen Universität Wien entwickelt und fand im Zuge dieser Diplomarbeit in der *Version 2.5* Anwendung. Dabei kam es ausschließlich zur Anwendung des Bauteiltemperaturverlaufstools (*BRTEMP 10*). Die Berechnungsgrundlagen sind in Kapitel 2.2.3.4 beschrieben.

5.6.1.1 Dateneingabe

Die Eingabe der erforderlichen Eingangsdaten erfolgte in 3 Schritten über die jeweiligen Eingabemasken (Abbildung 5-37 bis Abbildung 5-42).

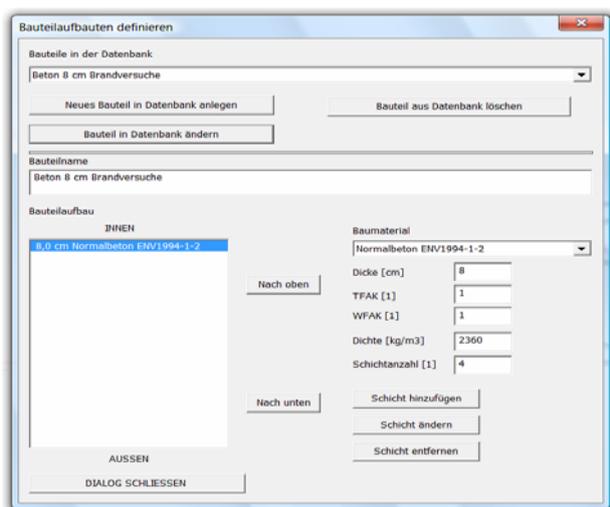


Abbildung 5-37: MRFC-Eingabemaske „Bauteilaufbauten definieren“

Normalbeton: (Dichte 2300 kg/m ³)	ENV 1994-1-2
<i>MRFC Nummer</i>	12
$c_{p,0} = 900 - 80 \cdot (T/120) - 4 \cdot (T/120)^2$	J/kgK T < 1200 °C
$c_{p,0} = 1300$	J/kgK T ≥ 1200 °C
Einfluß der Feuchte OK in Massen % für	100 < T < 200 °C
$c_{p,0}^* = 964$	J/kgK T = 100 °C
$c_{p,0}^* = 994 - 441 \cdot OK$	J/kgK T = 150 °C
$c_{p,0}^* = 1022$	J/kgK T = 200 °C
$c_{p,0} = 964 + (c_{p,0}^* - 964)/50 \cdot (T-100)$	J/kgK 100 < T < 150 °C
$c_{p,0} = c_{p,0}^* + (c_{p,0}^* - 1022)/50 \cdot (T-150)$	J/kgK 150 < T < 200 °C
$\lambda_{t,0} = 2 - 0,24 \cdot (T/120) - 12 \cdot 10^{-5} \cdot (T/120)^2$	W/mK T < 1200 °C
$\lambda_{t,0} = 0,8$	W/mK T ≥ 1200 °C
$a_0 = \lambda_{t,0} / (\rho \cdot c_{p,0})$	

Abbildung 5-38: Normalbeton gem. ENV 1994-1-2 (AGB, S.78/[29] - Manual 1)

Der erste Schritt umfasste die Definition der Probekörper mit den jeweiligen Bauteildicken. Um die Bauteildickenabhängigkeit der Temperaturverläufe anhand der *MRFC-Simulationen* ausreichend genau beschreiben zu können wurden Plattendicken von 4, 8, 20 und 24 cm gewählt. Auf eine gesonderte Simulation der Serie HV12 RK01, KM-HV16 RK01 und KM-HV12 RK02 zum Zwecke der Kontrolle der Versuchsergebnisse wurde zunächst verzichtet, da zuerst die iterative Ermittlung der entsprechenden Baustoffeigenschaften zu ermitteln war und dies anhand eines Vergleiches der Simulationsdaten mit den Temperaturkurven der

Serie KM-HV8 RK01 (8 cm Normalbetonplatte mit einer mittleren Dichte von 2360 kg/m^3 und $1,5 \text{ kg/m}^2$ PP-Fasern) erfolgen sollte.

Die Bausstoffeigenschaften wurden dabei durch Wahl eines voreingestellten, den Vorgaben des Eurocodes 4 (ENV1994-1-2) entsprechenden Normalbetons definiert.

Die Schichtdicke wurde so gewählt, dass später eine Vergleichbarkeit der berechneten Daten mit jenen der Messungen lt. 5.5 möglich war.

In Abbildung 5-38 sind die Festlegungen bezüglich der Wärmeleitfähigkeit λ und der spezifische Wärmekapazität c angeführt.

Als Nächstes waren die Wärmeübergangsdaten nach Eurocode 4 festzulegen (Abbildung 5-39 und Abbildung 5-40). Dabei sollte durch iterative Variation der Strahlungszahl ε Temperaturkurven entsprechend der Brandversuche simuliert werden. Als Vergleichsdaten wurden die Temperaturkurven der Prüfsreihe KM-HV8 RK01 (8 cm dicke Normalbetonplatten mit $1,5 \text{ kg/m}^3$ PP-Fasern) gewählt. Der vorhandene Wassergehalt von, im Mittel, 3,9 % wurde in den Eingabemasken ebenfalls gesondert berücksichtigt und fand so in den simulierten Temperaturkurven Berücksichtigung. Der Einfluß des Wärmeübergangskoeffizienten α ist in den Simulationen der Software *MRFC* branddauerabhängig. Eine manuelle Variation von α ist nur durch Einsetzen einer konstanten Wärmeübergangszahl α möglich, weshalb auf eine Variation des Wärmeübergangskoeffizienten verzichtet wurde.

Abbildung 5-39: *MRFC*-Eingabemaske „Wärmeübergangsdaten“ (Übergang in Brandkammer)

Abbildung 5-40: MRFC-Eingabemaske „Wärmeübergangsdaten“ (Übergang zu Außenluft)

Die Datensatzerstellung beinhaltet die Eingabe der Brandkurve (vorhandene Brandkurve bzw. ETK), der Branddauer, der Iterationsschrittweiten, der Wärmeübergänge und der vorher definierten Bauteile und ist in Abbildung 5-41 dargestellt. Die Ausgabeschrittweite wurde auf 30 Sekunden gesetzt und eine Betrachtungsdauer von 60 Minuten gewählt.

Abbildung 5-41: MRFC-Eingabemaske „Datensätze für die MRFC Bauteilberechnung“

Die abschließende Bauteilberechnung (Abbildung 5-42) lieferte, in den zuvor definierte Bauteiltiefen, die Berechnungsergebnisse in Form von Textdateien, welche darauffolgend mit einer Tabellenkalkulationssoftware die grafische Darstellung der errechneten Temperaturverläufe ermöglichte.

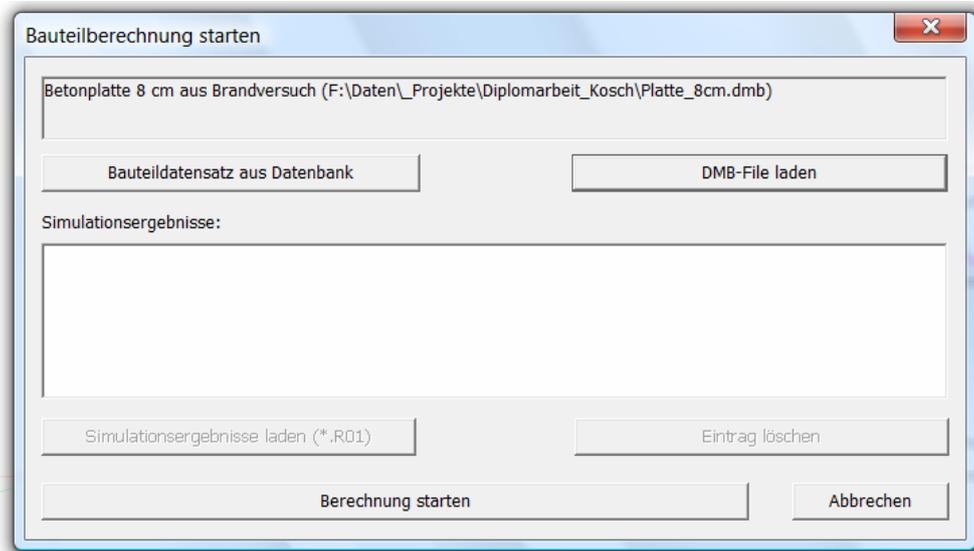


Abbildung 5-42: MRFC-Eingabemaske „Bauteilberechnung starten“

5.6.1.2 Vergleich Simulation – Messergebnisse, Iteration der Stoffwerte

Wie schon eingangs beschrieben erfolgte die Anpassung der Stoffeigenschaften im Rahmen dieser Arbeit durch Variation der Strahlungszahl ε . Die Strahlungszahl, oder auch Emissionsgrad ε , ist eine frequenzabhängige Größe und gibt die abgestrahlte Energie eines Körpers im Verhältnis zur abgestrahlten Energie eines schwarzen Strahlers der selben Temperatur an. In der Regel beträgt die Strahlungszahl bei Betonoberflächen unter Einwirkung natürlicher Brände zwischen 0,60 (bei 1 μm Wellenlänge) und 0,7 (Schneider, Lebeda, S.136/[1]) bzw. bei Normaltemperatur 0,96 (bei 20 °C und 15 μm Wellenlänge).

Die Variation der Strahlungszahl erfolgte bei einem Auftreten zu heißer Simulationstemperaturkurven durch Abminderung der Strahlungszahl bis zu ε -Werten um 0,4 (136/[2]). Abbildung 5-43 und Tabelle 5-1 zeigen selbst bei $\varepsilon = 0,4$ an der brandzugewandten Plattenoberfläche durchwegs höhere Simulationstemperaturkurven als die gemessenen Temperaturkurven. Die Änderung der Stoffeigenschaften durch Wahl eines anderen vordefinierten Normalbetons und die Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten α brachten ebenfalls keine Annäherung an die gemessenen Temperaturverteilungen in 1 cm Messtiefe.

Tabelle 5-1: Vergleich Simulations- und Messergebnisse in 1 cm Messtiefe unter Berücksichtigung der gemessenen Brandkurve

Strahlungszahl [1]	5 min Branddauer	15 min Branddauer	30 min Branddauer	45 min Branddauer
	MRFC-simulierte Temperaturen			
$\varepsilon = 0,6$	149 °C	398 °C	591 °C	712 °C
$\varepsilon = 0,5$	142 °C	377 °C	574 °C	700 °C
$\varepsilon = 0,4$	134 °C	348 °C	550 °C	681 °C
Gemessene Temperaturen (gemittelte Werte)				
$\varepsilon_{\text{vorh.}} = \text{unbekannt}$	97 °C	284 °C	442 °C	508 °C

Abbildung 5-43 zeigt während der ersten 20 Minuten gute Übereinstimmungen der Messergebnisse mit den Werten der MRFC-Simulation, was auf eine korrekte Annahme der Wärmeübergangszahl α schließen lässt. Eine Ausnahme davon bilden die Brandkurven in 1 cm Messtiefe, wo schon nach etwa 4 Minuten eine Unterschreitung der Simulationswerte durch die Messwerte auftritt.

Deutlich erkennbar ist der Einfluss des Betonwassergehalts von 3,9 %, welcher sich beispielsweise in Messtiefe 1 cm durch einen abgeflachten Temperaturverlauf zwischen Minute 4 und 8 zeigt sowohl in den simulierten Kurven als auch in den gemessenen Temperaturkurven zeigt.

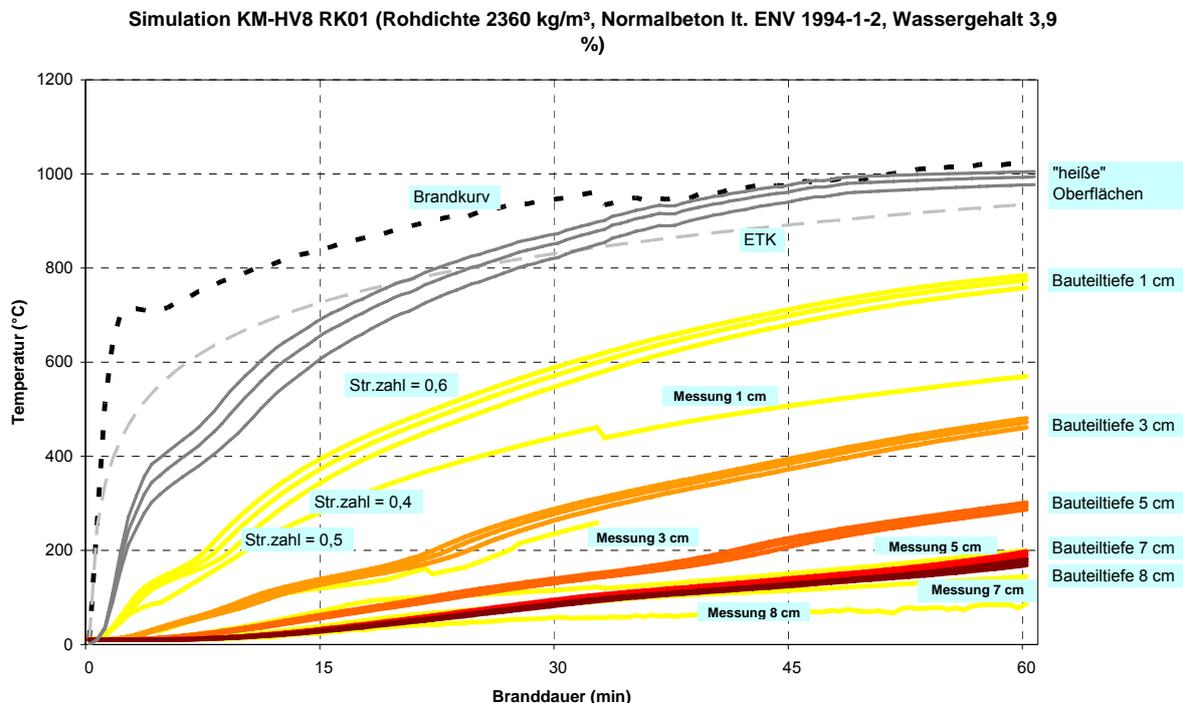


Abbildung 5-43: Vergleich Übereinstimmung Simulation und Messergebnisse bei einer 8 cm dicken Normalbetonplatte

Zusammenfassend trifft nun die Behauptung zu, dass die Vorgaben gemäß EC4, welche den Simulationen lt. Kapitel 5.6.1.1 zu Grunde lagen, bezüglich der Temperaturberechnung im Brandfall auf die gewählte Versuchsanordnung nicht zutreffen. Auch eine iterative Variation der Wärmeübergangszahl α und der Strahlungszahl ε erwiesen sich nicht als zielführend.

Eine Anpassung der temperaturabhängigen Materialkennwerte kann als geeignete Lösung dieses Problems angesehen werden, da im EC4 naturgemäß nur durchschnittliche Werte für Normalbetone genannt werden.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Untersuchungen über das bauteildickenabhängige Temperaturverhalten von Normalbeton unter Brandbelastung nun ausschließlich auf Simulationsdaten der Brandsimulationssoftware *MRFC Version 2.5* basierend fortgesetzt.

5.6.1.3 Simulationsauswertung der Plattendicken 4, 8, 20 und 24 cm

Die weiteren Untersuchungen berücksichtigen nur noch ausschließlich simulierte Daten. Dabei wurden die Bauteildicken 4, 8, 20 und 24 cm unter Berücksichtigung eines Wassergehalts im Beton von 3,9 % untersucht und miteinander verglichen. Den Simulationen wurde dabei die Einheitstemperaturkurve gemäß ÖNORM EN 1363-1 zu Grunde gelegt.

Folgende Rahmenbedingungen wurden für die Simulationen gewählt:

- Normalbeton gemäß ENV 1994-1-2 (s. Abbildung 5-38)
- Dichte Normalbeton $\rho = 2360 \text{ kg/m}^3$
- Brandkurve ETK
- Strahlungszahl $\varepsilon = 0,50$
- Wärmeübergangszahl α ist gemäß *MRFC*-Voreinstellungen branddauerabhängig
- Wassergehalt Beton $w = 3,9 \%$
- Wärmeübergänge: Innenraum...Heißgas 25 (EC); Außenraum...Kaltgas
- Iterationsschrittweite 10 s
- Ausgabezeitschrittweite 60 s
- Betrachtungsdauer 90 min
- Starttemperatur $10 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Darstellung der simulierten Temperaturverläufe der einzelnen Platten ist in Abbildung 11-9 bis Abbildung 11-12 im Anhang ersichtlich.

Die Auswertung erfolgt durch den Vergleich der simulierten Temperaturkurven. Bei Betrachtung von Abbildung 5-44 fällt auf, dass an der befeuerten Oberfläche nahezu kein Unterschied in den auftretenden Temperaturen vorhanden ist. Lediglich bei Platten der Dicke 4 cm sind minimale Unter- bzw. Überschreitungen der fast deckungsgleichen Verläufe der 8, 20 und 24 cm dicken Platten erkennbar.

In 1 cm Bauteiltiefe wird der Einfluss der unterschiedlichen Plattendicken schon deutlicher, obwohl auch hier nahezu kein Unterschied in den Temperaturverläufen bei Plattendicken von 8 bis 24 cm sichtbar ist. Eine Ausnahme davon bilden die ersten 10 Minuten, wo alle 4 Temperaturkurven nahezu deckungsgleich sind.

In Bauteiltiefen ab 3 cm treten Abweichungen der auftretenden Temperaturen in 8 cm dicken Bauteilen von jenen der 20 bis 24 cm-Platten auf.

Generell kann beobachtet werden, dass bei zunehmender Messtiefe eine klare Abhängigkeit der Temperaturverläufe von der Plattendicken ersichtlich wird. Dies betrifft die Plattendicken 20 bis 24 cm in einem weitaus geringeren Ausmaß, da selbst in 9 cm Bauteildicke nach 90 Minuten unter ETK-Brandbelastung nur eine Differenz von 0,17 °C auftritt.

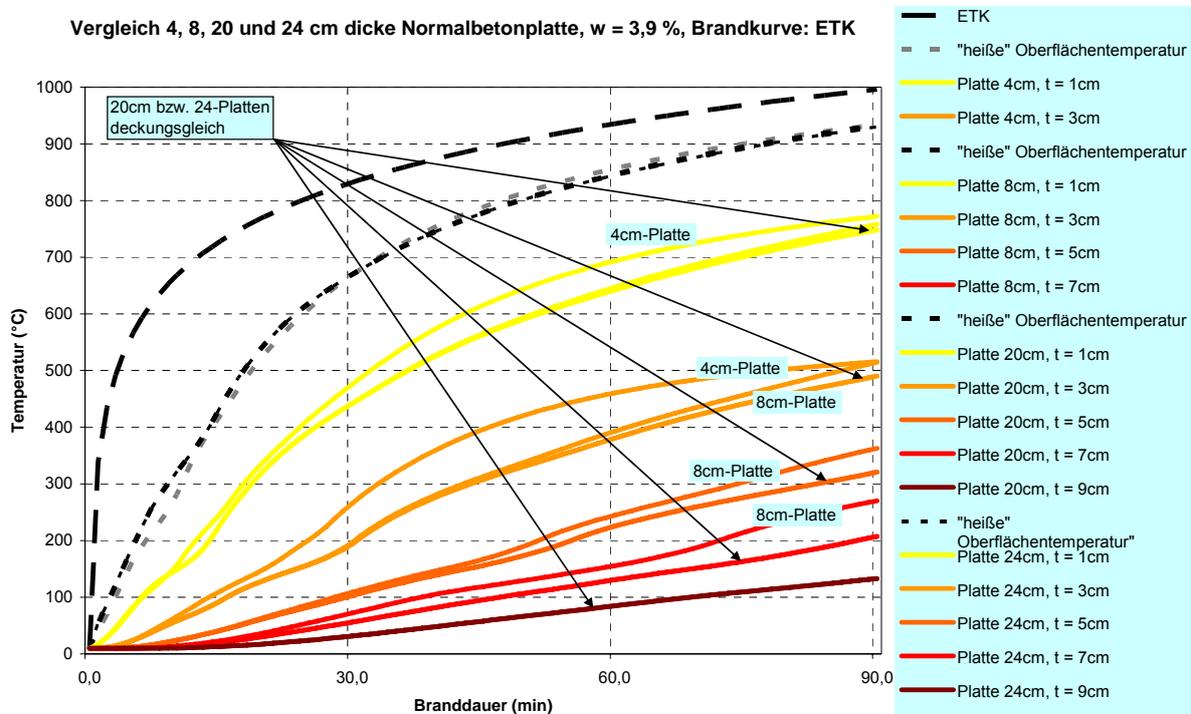


Abbildung 5-44: Vergleich simulierter Temperaturkurven von 4, 8, 20 und 24 cm dicken Normalbetonplatten in den Bauteiltiefen 1 bis 9 cm unter einseitiger ETK-Belastung

Auf eine Untersuchung der Temperaturverläufe in den Bauteiltiefen 11 bis 19 wird an dieser Stelle verzichtet, da sich in diesen Bereichen nahezu deckungsgleiche Verläufe einstellen. Beispielhaft sei an dieser Stelle bei Betrachtung von 20 und 24 cm dicken Platten eine errechnete Temperaturdifferenz von 5,3 °C in einer Bauteiltiefe von 19 cm angegeben. Die höhere Temperatur ist dabei der „dünnere“, 20 cm dicken Normalbetonplatte zuzuordnen.

Im Gegenzug dazu kommt der Betrachtung der unbefeuerten, der Außenluft zugewandten Plattenoberflächen weitaus größerer Bedeutung zu, da diese weit größere Temperaturunterschiede aufweisen. Abbildung 5-45 zeigt den, mit steigender Bauteildicke geringer werdenden, Unterschied zwischen der unbefeuerten Plattenoberfläche und der Übergangstemperatur zur umgebenden Außenluft. Während bei Plattendicken von 4 cm nach 90 Minuten unter ETK-Brandbelastung noch ein Unterschied von 49 °C herrscht, sinkt diese Differenz bei 24 cm dicken Platten auf 0,3 °C. In diesen Platten wird nach 90 minütiger Brandbelastung mittels Einheitstemperaturkurve die Außentemperatur auch nur noch um etwa 6 °C überschritten. Der Einfluss der mitberücksichtigten Betonfeuchte von 3,9 % ist durch flacher geneigte Temperaturverläufe gekennzeichnet und in Abbildung 5-45 deutlich erkennbar.

Vergleich 4, 8, 20 und 24 cm dicke Normalbetonplatten, w = 3,9 %, Brandkurve: ETK

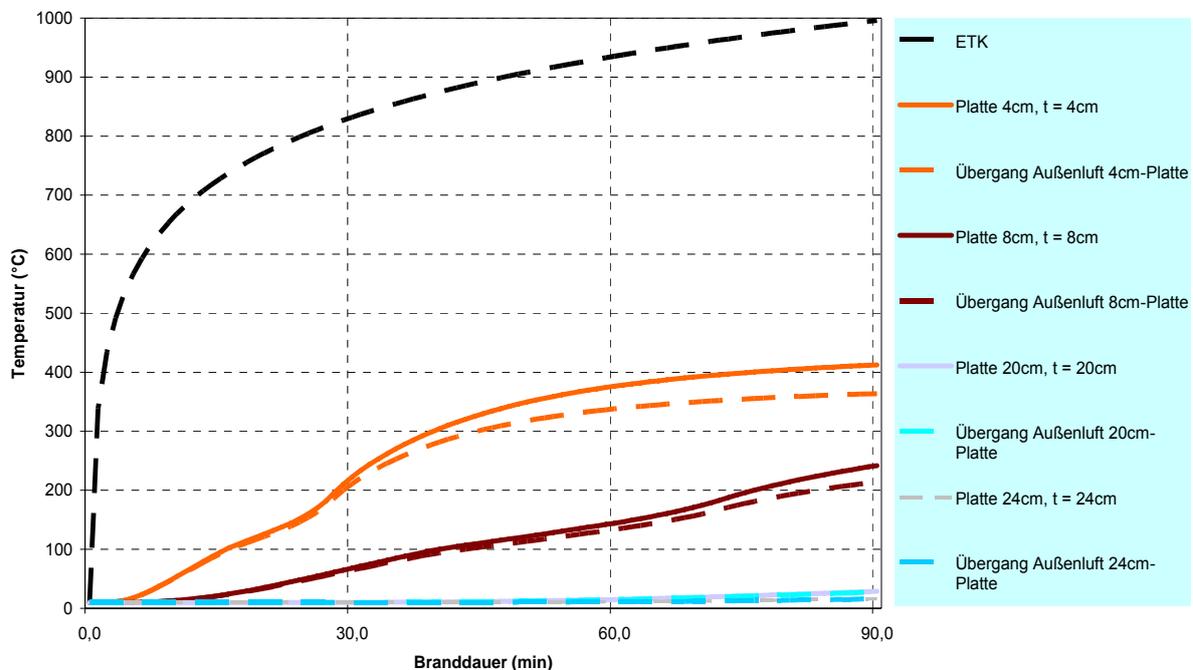


Abbildung 5-45: Vergleich simulierter Temperaturkurven von 4, 8, 20 und 24 cm dicken Normalbetonplatten an den unbefeuerten Plattenoberflächen unter einseitiger ETK-Belastung

Den Simulationsdaten kann weiters der Zeitpunkt der erstmaligen Überschreitung der Umgebungslufttemperatur an den unbefeuerten Oberflächen entnommen werden (Abbildung 5-46). Da nur Simulationsergebnisse der Bauteile mit 4, 8, 20 und 24 cm Dicke zur Verfügung stehen, wurde eine Funktion 6. Ordnung zur Erstellung einer Trendlinie herangezogen.

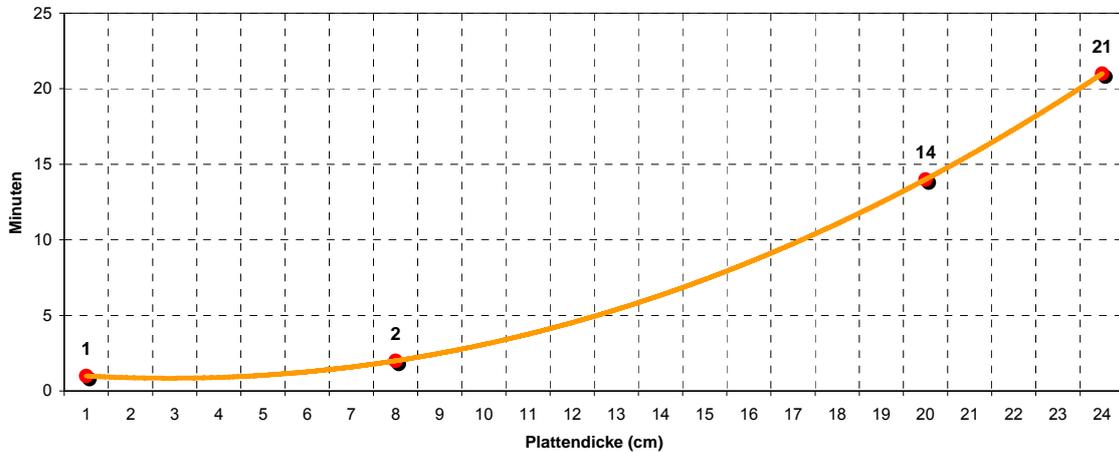


Abbildung 5-46: Simulierter Zeitpunkt bei Überschreitung der Außenlufttemperatur an der unbefeuerten Oberfläche einseitig befeuerter Normalbetonplatten in Abhängigkeit der Plattendicke unter ETK-Brandbelastung

Die Kenntnis der Temperaturverläufe in den verschiedenen dicken Normalbetonplatten ermöglicht weiters die Erstellung von Diagrammen, welche die auftretenden Oberflächentemperaturen an den, der Außenluft zugewandten, Plattenoberflächen beschreiben. Abbildung 5-47 zeigt diese Temperaturen in Abhängigkeit der Branddauer.

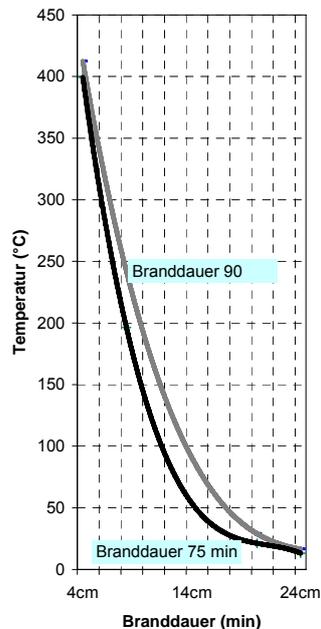


Abbildung 5-47: Simulierte Temperaturen von unbefeuerten Plattenoberflächen nach 90 bzw. 75 min in Abhängigkeit der Plattendicke bei einseitiger ETK-Brandbeanspruchung

5.7 Schlussbetrachtung der Versuche bzw. Simulationen

Die **Brandversuche** zeigten, dass die Zugabe von $1,5 \text{ kg/m}^3$ Polypropylenfasern unter den gegebenen Prüfbedingungen nicht ausreichend sind um explosive Abplatzungen zu verhindern, wenngleich diese Abplatzungen nur bei einer von 12 befeuerten Normalbetonplatten auftraten. Bei den 3 Platten ohne PP-Fasern kam es erwartungsgemäß zu explosionsartigen, etwa handflächengroßen Abplatzungen. Diese konnten jedoch nur innerhalb der ersten ca. 6 Minuten des jeweiligen Brandversuches beobachtet werden und klangen danach vollständig ab.

Bei den Probekörpern mit $1,5 \text{ kg/m}^3$ PP-Fasern waren weiters schon nach ca. 30 Minuten massive Festigkeitsverluste innerhalb der dehydrierten Plattenoberflächen sichtbar, während die Probekörper ohne PP-Fasern selbst neun Wochen nach den Brandversuchen noch keine sichtbaren Beeinträchtigungen aufwiesen. Die Ergebnisse der Restfestigkeitsuntersuchungen bestätigten diese Beobachtungen, da die Probewürfel der Betonrezeptur RK01^(*) (mit $1,5 \text{ kg/m}^3$ Polypropylenfasern) im Vergleich zu der 28-Tage-Druckfestigkeit um durchschnittlich 16 % niedrigere Werte erzielten als die Probewürfel der Rezeptur RK02 (ohne PP-Fasern) ergaben. Grund dafür ist die starke Porenbildung im Beton durch das Ausschmelzen der PP-Fasern und den daraus bedingten leichten Feuchtezutritt in das Innere des Betons in Verbindung mit der hitzebedingten Zerstörung des Portlandzements im Zementstein. Durch die Bildung von Kalkhydrat, schon unmittelbar nach dem Ende der Brandversuche, kommt es durch die Volumenzunahme zu einem intensiven Kalktreiben.

Die Stärke der zermürbten Betonschichten bei den Probekörpern mit PP-Faserbeimengung betrug zwischen 0,5 und 1 cm. Eine Abhängigkeit dieser Schichtdicke von der Branddauer war nicht feststellbar.

Mit Hilfe der **Simulationsergebnisse** gelang der Nachweis der Bauteildickenabhängigkeit in einseitig befeuerten Normalbetonbauteilen (s. Abbildung 5-44), wenngleich die simulierten Temperaturunterschiede in 1 cm Plattentiefe bei Plattendicken von 8 bis 24 cm minimal waren, und sich erst bei steigender Branddauer und Bauteiltiefe verstärkten. Bei Normalbetonplatten der Dicke 20 bis 24 cm war die Bauteildickenabhängigkeit zwar in allen Messtiefen nachweisbar, jedoch bewegten sich die Temperaturdifferenzen z.B. in der Bauteiltiefe 19 cm unter 90 minütiger ETK-Brandbeanspruchung nur zwischen 0 und $5,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Der **Vergleich der gemessenen Temperaturkurven** der Versuchsserien mit 8 bzw. 16 cm Dicke bestätigten die Bauteildickenabhängigkeit der Temperaturverläufe in einseitig befeuerten Normalbetonplatten (Abbildung 5-31).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Untersuchungen der unter Brandeinwirkung auftretenden **Temperaturverläufe** in Beton- bzw. Stahlbetonbauteilen sind schon seit Jahren Gegenstand zahlreicher Laborversuche und theoretischer Abhandlungen. Sowohl einseitig als auch mehrseitig brandbeanspruchte Bauteile wurden in der Vergangenheit mit dem Ziel untersucht, Aussagen hinsichtlich der auftretenden Bewehrungstemperaturen und der Möglichkeit zur Einstufung in Feuerwiderstandsklassen treffen zu können. Diese Versuche und Berechnungen erfolgten unter Variation der zugegebenen Zuschlagstoffe, der Bauteildicken und der Branddauer mit dem Ergebnis, dass Leichtbetonbauteile bei einseitiger Brandbeanspruchung erheblich niedrigere Bauteil- und Bewehrungstemperaturen aufweisen als vergleichbare Normalbetonbauteile.

Abgesehen von den Wärmeleitungseigenschaften von Beton haben **Abplatzungen**, durch die daraus resultierende Bauteildickenminimierung, massive Auswirkungen auf die Temperaturen in Betonbauteilen. Eigens für die gegenständliche Arbeit durchgeführte Brandversuche haben gezeigt, dass die Einflüsse einer solchen Abplatzungen bei 20 cm dicken Normalbetonplatten über die gesamte Bauteildicke durch erhöhte Temperaturkurven deutlich nachweisbar sind und sich nur bei entsprechenden Vorkenntnissen über die Technologie und Festigkeitseigenschaften von Normalbeton vorhersagen lassen.

Um die Einflüsse dieser ungewollten Abplatzungen zu verhindern bzw. zu minimieren, können den Betonrezepturen Fasern beigemischt werden. Dabei hat sich herausgestellt, dass Polypropylenfasern diesbezüglich die besten Resultate erzielen, da diese die Kapazität des Wassertransports im Bauteil erhöhen und so die Abfuhr des entstehenden Wasserdampfes ermöglichen und somit direkt die wesentliche Ursache der Abplatzungen bekämpfen. Während der Laborversuche konnte der positive Einfluss der Polypropylenfasern bestätigt werden, da nur eine der 12 Betonplatten der Rezeptur RK01^(*) Abplatzungen zu verzeichnen hatte, während alle 3 Platten der Rezeptur RK02 (ohne PP-Fasern) explosionsartige Abplatzungen erfuhren.

Eine Faserabhängigkeit des Eindringens der Temperaturfronten in die Normalbetonbauteile konnte im Gegensatz zu hochfesten Betonen übereinstimmend mit [41] und [44] nicht festgestellt werden. Unterschiedliche Gradienten der Temperaturkurven von Platten gleicher Stärke mit bzw. ohne PP-Fasern waren nach den Laborversuchen ebenfalls nicht nachweisbar.

Die Ergebnisse der durchgeführten **Laborbrandversuche** betreffen neben den Betonfestigkeiten ausschließlich die bauteildickenabhängigen Temperaturverläufe.

Die **Restfestigkeitsuntersuchungen** ergaben, dass jene Probewürfel mit der Betonrezeptur RK01^(*) (mit 1,5 kg/m³ Polypropylenfasern) im Vergleich zu der 28-Tage-Druckfestigkeit um durchschnittlich 16 % niedrigere Werte erzielten als die Probewürfel der Rezeptur RK02. Grund dafür ist die starke Porenbildung im Beton durch das Ausschmelzen der PP-Fasern und den daraus bedingten leichten Feuchtezutritt in das Innere des Betons in Verbindung mit der hitzebedingten Zerstörung des Portlandzements im Zementstein. Die Bildung von Kalkhydrat beginnt schon unmittelbar nach den Brandversuchen und führt durch die Volumenzunahme zu einem intensiven Kalktreiben. Derartige Prozesse sind bei den Probekörpern ohne Polypropylenfasern selbst Wochen nach den Brandversuchen nicht feststellbar. Die Stärke der zermürbten Betonschicht betrug zwischen 0,5 und 1 cm – eine Abhängigkeit dieser Schichtdicke von der kurzen Branddauer war nicht feststellbar. Es ist jedoch bekannt, dass die Portlandzementumwandlung bei 450 °C beginnt (s. Abbildung 5-19) und diese Temperaturtiefe somit etwa der Zerfallstiefe durch Treiben entspricht.

Die Kernaussage dieser Arbeit betrifft den Nachweis der **Bauteildickenabhängigkeit der Temperaturkurven** unter einseitiger Brandeinwirkung in Normalbetonplatten. Dieser Nachweis erfolgte durch den Vergleich gemessener Temperaturverläufe in 8 bzw. 16 cm dicken Platten sowie mit Hilfe simulierter Temperaturverläufe in 4, 8, 20 und 24 cm dicken Normalbetonplatten unter Berücksichtigung des Wassergehaltes im Beton. Unter gleich bleibenden Rahmenbedingungen wie z.B. der Brandkurve, des Wassergehaltes, der Außentemperatur und der Stoffeigenschaften in den untersuchten Bauteilen, können die betrachteten Bauteiltiefe sowie die Branddauer als maßgebliche Einflüsse auf die Abhängigkeit des Betontemperaturverhaltens von der Bauteildicke genannt werden.

Der **Vergleich** der **Brandversuchsergebnisse** mit errechneten Daten der **Brandsimulationssoftware MRFC Version 2.5** beschränkte sich auf den Vergleich der jeweiligen Temperaturkurven in 8 cm dicken Normalbetonplatten mit einem Wassergehalt w im Beton von 3,9 %. Der Vergleich lieferte differierende Temperaturkurven, mit der Begründung, dass die Vorgaben gemäß EC4, welche den Simulationen zu Grunde lagen, bezüglich der Temperaturberechnung im Brandfall auf die gewählte Versuchsanordnung nicht zutrafen. Auch eine iterative Variation der Wärmeübergangszahl α und der Strahlungszahl ε erwiesen sich nicht als zielführend.

Ausblick

Praktische Laborversuche waren schon seit jeher von großer Bedeutung, wenn es um die Erschließung neuer Wissensgebiete oder die Bestätigung theoretischer Erkenntnisse ging.

Laborversuche sind aber ebenso durch eventuell auftretende Fehlmessungen und Ungenauigkeiten gekennzeichnet, weshalb die Notwendigkeit von Kontrollmöglichkeiten durch computergestützte, dem Stand der Technik entsprechende Brandsimulationsberechnungen gegeben ist.

Leistungsfähige Softwarepakete, wie z.B. das von der *Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit* an der *Technischen Universität Wien* entwickelte Brandsimulationstool *MRFC Version 2.5*, sind somit von eminenter Bedeutung um einerseits brandtechnische Berechnungen unter umfassender Einbeziehung aller wichtigen Parameter durchführen zu können, aber auch um Laborversuchsergebnisse zu kontrollieren und beim Auffinden fehlerhafter Messreihen behilflich zu sein.

Laborversuche werden in jedem Fall auch in Zukunft notwendig sein, wenngleich der Anteil an leistungsfähigen Computersimulationen im Bereich des Brandschutzes stetig ansteigen wird.

7 Summary

Analyses of the range of temperatures under the action of high temperatures in normal-weight concrete are subject of numerous laboratory experiments and theoretical disquisitions for years. In the past, both unilateral and multilateral components under high temperatures were determined in order to receive information about the range of temperatures in the reinforcement as well as to classify building components into fire resistance classes. These analyses and calculations happened by varying the kind of aggregates, the thickness of the building components and the duration of the fire stress. Tests showed that components made of light-weight concretes experienced considerable lower temperatures as comparable components made of normal-weight concretes.

Apart from the properties of concrete concerning the thermal conductivity, spalling processes have a massive impact on the range of temperatures as minimisation of the thickness of building components takes place. In order to prevent these spallings, fibres can be used as concrete additives. In the course of tests it turned out that the use of polypropylene fibres achieved the best results. The effect of such fibres is based on the improvement of the permeation of concrete due to the formation of capillary pores, when melting and burning of the fibres under the action of high temperatures occurs. This leads to a higher vapour flow and reduces the pressure at the vaporization front. That positive influence was also affirmed during laboratory tests in the course of this master's thesis.

Aside from the compressive strength, the laboratory tests also concerned the dependency of the range of temperatures from the thickness of building components.

The residual compressive strength of specimens without PP-fibres showed higher values than comparable specimens with 1,5 kg/m³ PP-fibres. These higher values are a result of a denser structure in concretes without PP-fibres.

The core statement in the present elaboration concerns the proof of the dependency of the range of temperatures from the thickness of building components under unilateral action of high temperatures. That verification happened by comparison of measured ranges of temperatures in specimens of 8 and 16 cm thickness under induction of a water content of 3,9 % in the concrete as well as the examination of results of fire simulations, performed with *MRFC version 2.5*.

In consideration of concrete slabs with 8 cm thickness and a water content of 3,9 %, the contrasting of measured and simulated data showed differences between these temperature curves. A reason for that can be seen in the difference between the material properties that were chosen according to EC4 in the *MRFC*-simulation and the actual material properties of the specimens. A variation of the material properties, the coefficient of radiation ε and the heat transfer coefficient α did not result in an approach of the temperature curves.

The comparison of the range of temperatures in specimens with thicknesses of 4, 8, 20 and 24 cm, performed with *MRFC*, demonstrated a clear dependency on the duration of high temperatures as well as the depth of the examined layer in the specimens.

8 Literaturverzeichnis

- [1] *Schneider, U., Lebeda, C.*: Baulicher Brandschutz; 1.Auflage, Kohlhammer Verlag; Stuttgart; 2000
- [2] *Schneider U., Horvath, J.*: Brandschutzpraxis im Tunnelbau; 1.Auflage; Bauwerk Verlag GmbH; Berlin; 2006
- [3] *Schneider, U.; Diedrichs, U.; Weiß R.*: Hochtemperaturverhalten von Festbeton; SFB 148 Brandverhalten von Bauteilen, Teilprojekt 3, Arbeitsbericht 1975-1977, Teil 2; Braunschweig; 1977
- [4] *Horvath, J.*: Beiträge zum Brandverhalten von Hochleistungsbetonen; Dissertation an der Technischen Universität; Wien; 2003
- [5] *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/l06_30.pdf, download 11.2006
- [6] *Schneider U., Horvath, J.*: Behaviour of Ordinary Concrete at High Temperatures; Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz; Technische Universität Wien Wien; Heft 9; Wien; 2004
- [7] *Horvath,J.; Schneider, U.; Diedrichs, U.*: Brandverhalten von Hochleistungsbetonen; Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz; Technische Universität Wien Wien; Heft 11; 1.Auflage; Wien; 2004
- [8] *Schneider U., Horvath J.*: Temperaturverhalten von hochfesten Betonen für den Tunnelbau; Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien; Festschrift zum 60.Geburtstag von Univ.Prof.Dr.-Ing. Dietmar Hossler – Brandschutz und mehr...; Institut für Baustoffe Massivbau und Brandschutz an der Technischen Universität Braunschweig; Heft 173; Braunschweig; 2003
- [9] *Schneider, U.*: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 337; Verlag W. Ernst & Sohn; Berlin 1982
- [10] *Schneider, U.*: Brandschutz; Schriftenreihe des Instituts Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien; Wiener Baustofflehre Blätter; 2005

- [11] *Schneider, U.*: Grundlagen; Schriftreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien; Wiener Baustofflehre Blätter; Wien; 2001
- [12] *Schneider, U.*: Frischbeton; Schriftreihe des Instituts für Hochbau und Technologie - Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der TU Wien; Wiener Baustofflehre Blätter; Wien; 2006
- [13] *Schneider, U.*: Festbeton; Schriftreihe des Instituts für Hochbau und Technologie - Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien; Wiener Baustofflehre Blätter; Wien; 2006
- [14] *Schneider, U.*: Bindemittel; Schriftreihe des Instituts für Hochbau und Technologie - Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien; Wiener Baustofflehre Blätter; Wien; 2006
- [15] *Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit*. Referenzhandbuch für MRFC Version 2.5 (Multi-Room-Fire-Code); Technische Universität Wien; Bruchsal/Wien; 1998
- [16] *Baierl, C.W.*: Betonplatten für den Gleiskörper von Eisenbahntunnel, Brandversuche; Diplomarbeit an der Technischen Universität am Institut für Hochbau und Technologie, Wien; 2006
- [17] *Höfer, H.*: Brandverhalten eines Hochleistungsbetons für den Einsatz im Tunnelbau; Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien – Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz; Wien; 2003
- [18] *Drexler, C.*: Beitrag zum Brandschutz mit Beton für Unterirdische Verkehrsbauten; Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien – Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz; Wien; 2002
- [19] *Kusterle, W. et al.*: Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl und Spannbeton, BMVIT in Zusammenarbeit mit der HL-AG; Straßenforschung Heft 544; Wien; 2004
- [20] *Forschungsinstitut der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie*: Praxisverhalten von erhöht brandbeständigen (Innenschalen-) Beton; FFF-Projekt Nr. 806201; Wien; 2003
- [21] *Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik*: Richtlinie Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke; Wien; Ausgabe Juli 2005
- [22] *ÖNORM B 3303*: Betonprüfung; Österreichisches Normungsinstitut; Ausgabe 2002-09-01

- [23] *Station Wien-Innere Stadt*: Klimadaten; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik; Wien; Jänner 2007
- [24] *ÖNORM EN 12350-5*: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß; Österreichisches Normungsinstitut; Ausgabe 2000-04-01
- [25] *ÖNORM EN 12350-7*: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Österreichisches Normungsinstitut; Ausgabe 2002-05-01
- [26] *ÖNORM B 4710-1*: Beton – Teil1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1); Österreichisches Normungsinstitut; Ausgabe 2004-04-01
- [27] *ÖNORM EN 13501-1*: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Österreichisches Normungsinstitut, Ausgabe 2002-06-01
- [28] *ISO 834-1*: Feuerwiderstandsprüfungen – Bauteile – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Ausgabe 1999-09-15
- [29] *Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.*: Beton Brandschutz Handbuch - 1.Auflage; Beton-Verlag GmbH; Düsseldorf 1981
- [30] *Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik*: Sachstandbericht Brandeinwirkungen Straße, Eisenbahn, U-Bahn; Ausgabe Juli 2005
- [31] *ÖNORM EN1363-1*: Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Österreichisches Normungsinstitut, Wien; Ausgabe 2000-01-01
- [32] *ÖNORM EN 1363-2*: Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren; Österreichisches Normungsinstitut, Wien; Ausgabe 2000-01-01
- [33] *Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.*: Beton Brandschutz Handbuch - 2.Auflage; Verlag Bau+Technik; Düsseldorf 1999
- [34] *Dreyer J.*: Bauphysik I – Bautechnischer Wärmeschutz; Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien; Wien; 2001
- [35] *Huber, G., Riccabona C.*: Baustoffkunde; Manz Verlags- und Universitätsbuchhandlung; 2.Auflage; Wien; 1994
- [36] *Verein Deutscher Zementwerke VDZ*: Kompendium Zement und Beton – Kapitel 8; www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompendiumZementBeton/2-8_Brandschutz.pdf; 10/2006

- [37] *Beratungsstelle der österreichischen Zementindustrie und des österreichischen Betonvereins*: Zement und Beton; Zement + Beton Handels- und Werbe-GmbH; 30.Auflage; Wien; 1996/97
- [38] *Schneider, K.-J.*: Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen; Werner Verlag GmbH & Co. KG; Düsseldorf; 2002
- [39] *Maschinenfabrik Gustav Eirich*: Produktdatenblatt Intensivmischer Eirich Typ R; Hardheim; 2005
- [40] *Mineralienatlas*: <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Permeabilit%E4t>
- [41] *Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik*: Richtlinie Faserbeton; Wien; Ausgabe März 2002
- [42] *IBS Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung*: Die Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton; http://www.ibs-austria.at/fileadmin/downloads/IBS_BrandbestaendigkeitFaserStahl_Spannbeton.pdf; Download 03/07
- [43] *Wille, K., Dehn, F., Kützing, L.*: Fire Resistance of High Strength Concrete Columns with Fibre Cocktails under Loading; ;Institut für Massivbau und Baustofftechnologie an der Universität Leipzig; http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer08/I08_19.pdf; Download 03/07
- [44] *VersuchsStollen Hagerbach AG*: Fachtagung „Brandbeständiger Beton“; 2002; www.baumaschine.de/Portal/download.php?w=Tbg&p1=2000&p2=heft11&n=a707_708.pdf; Download 03/07

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Betondruckfestigkeit mit CEM I 32,5 R in Abhängigkeit der Zeit [37]	6
Abbildung 2-2: Luftporenmessapparatur	9
Abbildung 2-3: Wasserlagerung der Prüfkörper	10
Abbildung 2-4: Druckfestigkeitsbestimmung	12
Abbildung 2-5: Grenzsieblinie GK 16 (ÖNORM B 4710-1, S.35/[26])	17
Abbildung 2-6: Arten, Ursachen und Wirkungen von Abplatzungen bei normalfesten Betonen [32]	19
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Entstehung von Abplatzungen (<i>Schneider; Horvath, Dehn, S.284/[5]</i>)	21
Abbildung 2-8: Temperaturverteilung in einseitig nach DIN (ETK) beanspruchten Platten aus Normalbeton (<i>Kordina, S.67/[33]</i>)	23
Abbildung 2-9: Temperaturverteilung in einseitig nach DIN (ETK) beanspruchten Platten aus Leichtbeton (<i>Kordina, S.67/[33]</i>)	23
Abbildung 2-10: Temperatureindringkurven für feuchten Faserbeton (<i>Kusterle, [19]; VÖZ [20]</i>)	23
Abbildung 2-11: Spannungs-Dehnungsdiagramm von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei hohen Temperaturen (<i>Schneider, Horvath, S.72/[6]</i>)	24
Abbildung 2-12: Bezogener Hochtemperatur-E-Modul bei verschiedenen Vorlasten (<i>Schneider, Horvath, S.66/[6]</i>)	25
Abbildung 2-13: Einheitstemperaturkurve gemäß ÖNORM EN 1363-1	29
Abbildung 2-14: Temperaturzeitkurven gemäß ÖNORM EN 1363-2	31
Abbildung 3-1: Gesteinskörnungen für die Vorversuche	34
Abbildung 3-2: Portlandhüttenzement; PP-Fasern; Fließmittel	34
Abbildung 3-3: Sieblinie der Betonmischung RK01	35
Abbildung 3-4: Wirbelmischer der Fa. <i>Eirich</i> (inkl. Steuerschrank)	36
Abbildung 3-5: Strömungsbild <i>Eirich</i> [35]	36
Abbildung 3-6: Thermoelemente 12 cm	37
Abbildung 3-7: Holzschalungen	37
Abbildung 3-8: Luftlagerung der Probekörper (nach der Entnahme aus dem Wasserbad)	38
Abbildung 3-9: Brandversuchsanordnung	41
Abbildung 3-10: Brandkammerabmessungen (<i>Baierl, S.47/[16]</i>)	42
Abbildung 3-11: KM-VV12-1 RK01 nach Brandversuch	43

Abbildung 3-12: KM-VV12-3 RK01 nach Brandversuch	43
Abbildung 3-13: KM-VV12-2 RK01 nach Brandversuch	44
Abbildung 4-1: Gesteinskörnungen für die Hauptversuche	45
Abbildung 4-2: Betonkomponenten für die Hauptversuche	45
Abbildung 4-3: Sieblinie der Betonmischung RK01	48
Abbildung 4-4: Sieblinie der Betonmischung RK02	49
Abbildung 4-5: Sieblinie der Mischung RK01*	50
Abbildung 4-6: Versuchskörperanordnung auf der Brandkammer	57
Abbildung 4-7: KM-HV-1 RK01 nach Brandversuch	57
Abbildung 4-8: KM-HV8-2 RK01 nach Brandversuch	58
Abbildung 4-9: KM-HV8-3 RK01 nach Brandversuch	58
Abbildung 4-10: KM-HV16-1 RK01 nach Brandversuch	59
Abbildung 4-11: KM-HV16-2 RK01 nach Brandversuch	59
Abbildung 4-12: KM-HV16-3 RK01 nach Brandversuch	60
Abbildung 4-13: KM-HV12-1 RK01 nach Brandversuch	60
Abbildung 4-14: KM-HV20-1 RK01 nach Brandversuch	61
Abbildung 4-15: KM-HV20-2 RK01 nach Brandversuch	61
Abbildung 4-16: KM-HV20-3 RK01 nach Brandversuch	62
Abbildung 4-17: KM-HV12-2 RK01* nach Brandversuch	62
Abbildung 4-18: KM-HV12-3 RK01* nach Brandversuch	63
Abbildung 4-19: KM-HV12-1 RK02 nach Brandversuch	63
Abbildung 4-20: KM-HV12-2 RK02 nach Brandversuch	64
Abbildung 4-21: KM-HV12-3 RK02 nach Brandversuch	64
Abbildung 4-22: Restfestigkeit im Verhältnis zur 28-Tage-Festigkeit	69
Abbildung 5-1: Temperaturkurve KM-HV8-1 RK01 (Brandversuch 1)	72
Abbildung 5-2: Temperaturkurve KM-HV8-2 RK01 (Brandversuch 1)	73
Abbildung 5-3: Temperaturkurve KM-HV8-3 RK01 (Brandversuch 2)	74
Abbildung 5-4: Temperaturkurve KM-HV12-1 RK01 (Brandversuch 4)	75
Abbildung 5-5: Temperaturkurve KM-HV12-2 RK01* (Brandversuch 6)	75
Abbildung 5-6: Temperaturkurve KM-HV12-3 RK01* (Brandversuch 6)	76
Abbildung 5-7: Temperaturverteilung KM-HV16-1 RK01 (Brandversuch 2)	77
Abbildung 5-8: Temperaturverteilung KM-HV16-2 RK01 (Brandversuch 3)	78
Abbildung 5-9: Wasseraustritt KM-HV16-3 RK01	78
Abbildung 5-10: Temperaturverteilung KM-HV16-3 RK01 (Brandversuch 3)	79
Abbildung 5-11: Temperaturverteilung KM-HV20-1 RK01 (Brandversuch 4)	79

Abbildung 5-12: Temperaturverteilung KM-HV20-2 RK01 (Brandversuch 5)	80
Abbildung 5-13: Abplatzungen KM-HV20-3 RK01 (während Brandversuch 6)	80
Abbildung 5-14: Temperaturverteilung KM-HV20-3 RK01 (Brandversuch 5)	81
Abbildung 5-15: Temperaturverlauf KM-HV12-1 RK02 (Brandversuch 7)	82
Abbildung 5-16: Temperaturverlauf KM-HV12-2 RK02 (Brandversuch 7)	83
Abbildung 5-17: Temperaturverlauf KM-HV12-3 RK02 (Brandversuch 8)	83
Abbildung 5-18: Brandkammertemperaturen während der Versuche (inkl. ETK und KC-Kurve)	84
Abbildung 5-19: Zermürbungstiefe (<i>Kordina, Meyer-Ottens, S.207/[20]</i>)	85
Abbildung 5-20: KM-HV16-1 RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern; 2 Minuten nach dem Brandversuch)	86
Abbildung 5-21: KM-HV16-1 RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern; 1 Stunde nach dem Brandversuch)	86
Abbildung 5-22: KM-HV16-1 RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern; 1 Tag nach dem Brandversuch)	86
Abbildung 5-23: KM-HV12-1 RK02 (ohne PP-Fasern; 2 Minuten nach dem Brandversuch)	86
Abbildung 5-24: KM-HV12-1 RK02 (ohne PP-Fasern; 1 Tag nach dem Brandversuch)	86
Abbildung 5-25: KM-HV12-1 RK02 (ohne PP-Fasern; 3 Tage nach dem Brandversuch)	86
Abbildung 5-26: Gemittelte Temperaturverläufe bei Plattendicke 8 cm RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	88
Abbildung 5-27: Gemittelte Temperaturverläufe bei Plattendicke 12 cm RK01* (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	89
Abbildung 5-28: Gemittelte Temperaturverläufe bei Plattendicke 16 cm RK01 (mit 1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	89
Abbildung 5-29: Gemittelte Temperaturverläufe bei Plattendicke 12 cm RK02 (ohne PP-Fasern)	90
Abbildung 5-30: Mittlere Brandkammertemperaturen der Serien	91
Abbildung 5-31: Vergleich der gemittelten Temperaturkurven von Prüfkörpern der Dicken 8 bzw. 16 cm nach der gemessenen Brandkurve	92
Abbildung 5-32: Branddauerabhängige Temperaturverteilung in 8 cm dicken Platten RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	93
Abbildung 5-33: Branddauerabhängige Temperaturverteilung in 12 cm dicken Platten RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	94
Abbildung 5-34: Branddauerabhängige Temperaturverteilung in 16 cm dicken Platten RK01 (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	94

Abbildung 5-35: Branddauerabhängige Temperaturverteilung in 12 cm dicken Platten RK02 (ohne PP-Fasern)	95
Abbildung 5-36: Gemessene Temperaturverteilungen in 8 cm bzw. 16 cm dicken Platten (1,5 kg/m ³ PP-Fasern)	95
Abbildung 5-37: MRFC-Eingabemaske „Bauteilaufbauten“	96
Abbildung 5-38: Normalbeton gem. ENV 1994-1-2 (AGB,	96
Abbildung 5-39: MRFC-Eingabemaske „Wärmeübergangsdaten“ (Übergang in Brandkammer)	97
Abbildung 5-40: MRFC-Eingabemaske „Wärmeübergangsdaten“ (Übergang zu Außenluft)	98
Abbildung 5-41: MRFC-Eingabemaske „Datensätze für die MRFC Bauteilberechnung“	98
Abbildung 5-42: MRFC-Eingabemaske „Bauteilberechnung starten“	99
Abbildung 5-43: Vergleich Übereinstimmung Simulation und Messergebnisse bei einer 8 cm dicken Normalbetonplatte	100
Abbildung 5-44: Vergleich simulierter Temperaturkurven von 4, 8, 20 und 24 cm dicken Normalbetonplatten in den Bauteiltiefen 1 bis 9 cm unter einseitiger ETK-Belastung	102
Abbildung 5-45: Vergleich simulierter Temperaturkurven von 4, 8, 20 und 24 cm dicken Normalbetonplatten an den unbefeuerten Plattenoberflächen unter einseitiger ETK-Belastung	103
Abbildung 5-46: Simulierter Zeitpunkt bei Überschreitung der Außenlufttemperatur an der unbefeuerten Oberfläche einseitig befeuerter Normalbetonplatten in Abhängigkeit der Plattendicke unter ETK-Brandbelastung	104
Abbildung 5-47: Simulierte Temperaturen von unbefeuerten Plattenoberflächen nach 90 bzw. 75 min in Abhängigkeit der Plattendicke bei einseitiger ETK-Brandbeanspruchung	104
Abbildung 11-1: Seriengrafik Hauptversuchsdruckversuche	125
Abbildung 11-2: Seriengrafik Restfestigkeitsuntersuchungen	128
Abbildung 11-3: KM-HV8-3 RK01(mit PP-Fasern) nach 1 h, nach 1 d, nach 3 d	129
Abbildung 11-4: KM-HV16-1 RK01 (mit PP-Fasern) nach Brandversuch, nach 1 h, nach 1 d	129
Abbildung 11-5: KM-HV16-2 RK01 (mit PP-Fasern) nach Brandversuch, nach 2 h, nach 3 d	129
Abbildung 11-6: KM-HV16-3 RK01 (mit PP-Fasern) nach Brandversuch, nach 2 h, nach 3 d	129
Abbildung 11-7: KM-HV12-1 RK01 (mit PP-Fasern) während Brandversuch, nach Brandversuch, nach 2 h	130
Abbildung 11-8: Brandversuchskörper vom 9.1.2007, nach 3 d	130

Abbildung 11-9: Simulierten Temperaturverläufe in 4 cm dicken Normalbetonplatten mit $w = 3,9 \%$ unter ETK	130
Abbildung 11-10: Simulierten Temperaturverläufe in 8 cm dicken Normalbetonplatten mit $w = 3,9 \%$ unter ETK	131
Abbildung 11-11: Simulierten Temperaturverläufe in 20 cm dicken Normalbetonplatten mit $w = 3,9 \%$ unter ETK	131
Abbildung 11-12: Simulierten Temperaturverläufe in 24 cm dicken Normalbetonplatten mit $w = 3,9 \%$ unter ETK	132

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: PZ-Klinkerphasen, ihre Eigenschaften und Massenanteile (<i>Schneider</i> , S.39/[25])	4
Tabelle 2-2: Zuschläge für Leicht-, Normal- und Schwebeton (<i>Schneider</i> , S.6.5/[38])	7
Tabelle 2-3: Ausbreitmaßklassen gemäß ÖNORM B 4710-1	8
Tabelle 2-4: Festigkeitsklasseneinteilung gemäß ÖNORM B 3303	13
Tabelle 2-5: Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwebeton gemäß ÖNORM B 4710-1	14
Tabelle 3-1: Prüfkörperauflistung	33
Tabelle 3-2: Betonrezeptur RK01	35
Tabelle 3-3: Vorversuchsdruckfestigkeiten	40
Tabelle 3-4: Wassergehalt Vorversuchsprobewürfel	40
Tabelle 4-1: Sieblinienberechnung der Gesteinskörnungen für RK01	46
Tabelle 4-2: Sieblinienberechnung der Gesteinskörnungen für RK01* und RK02	47
Tabelle 4-3: Betonrezeptur RK01	48
Tabelle 4-4: Betonrezeptur RK02	49
Tabelle 4-5: Betonrezeptur RK01*	50
Tabelle 4-6: Hauptversuchsdruckfestigkeiten der Würfel 15x15x15 cm ³	53
Tabelle 4-7: Wassergehalt Hauptversuchsprobekörper	55
Tabelle 4-8: Übersicht Brandversuche	56
Tabelle 4-9: Masseverluste Hauptversuchsprobewürfel nach Brand	65
Tabelle 4-10: Zusammenstellung der Druckversuchsergebnisse	66
Tabelle 4-11: Vergleich Druckfestigkeiten (vor bzw. nach Brandbelastung)	67
Tabelle 5-1: Vergleich Simulations- und Messergebnisse in 1 cm Messtiefe unter Berücksichtigung der gemessenen Brandkurve	100
Tabelle 11-1: Gesamtübersicht Versuchskörper	133
Tabelle 11-2: Gesamtübersicht Versuchskörper (Fortsetzung)	134

11 Anhang

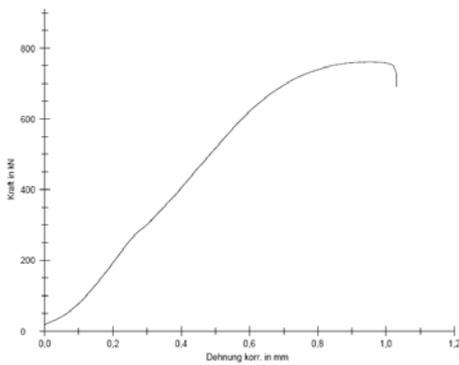
Im Anhang sind Auszüge der Druckversuchsprotokolle, zusätzliche Fotos, zusätzliche Temperaturverlaufdiagramme und eine tabellarische Gesamtübersicht aller Probekörper (Tabelle 11-1 und Tabelle 11-2) inklusive der wesentlichen Versuchsdaten ergänzend angeführt.

Sämtliche zu dieser Arbeit zugehörigen Messwerte aller Thermoelemente sowie der *MRFC*-Simulationen liegen am Institut für Hochbau und Technologie - Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien in Form eines Datenträgers auf.

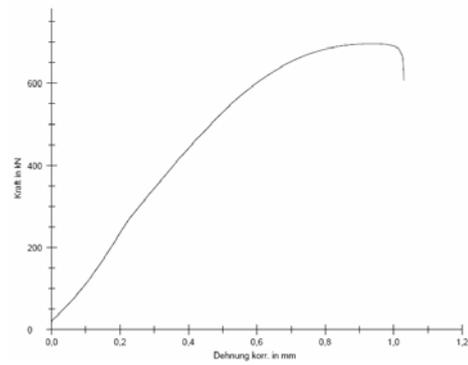
11.1 Druckversuche

Die Dehnungsmessung während der Versuche erfolgte mittels externer Wegaufnehmer

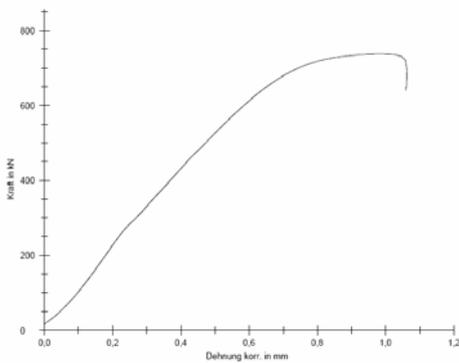
11.1.1 Vorversuche



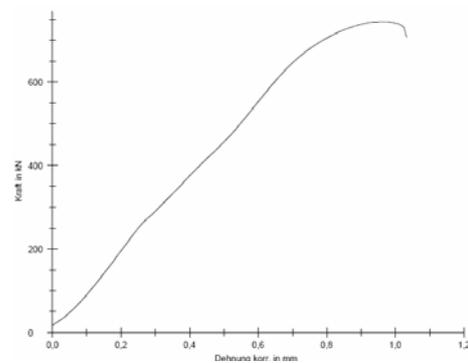
Probewürfel	Betoniert:	Geprüft:
KM-VVPW2 RK01	21.11.06	30.11.06



Probewürfel	Betoniert:	Geprüft:
KM-VVPW4 RK01	21.11.06	30.11.06

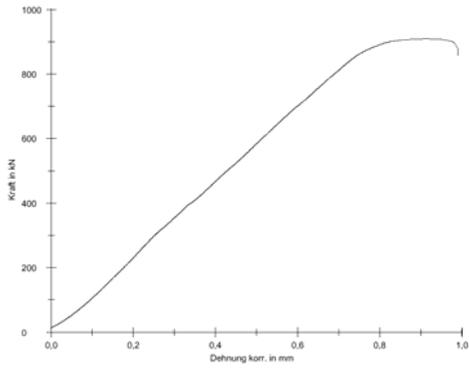


Probewürfel	Betoniert:	Geprüft:
KM-VVPW5 RK01	21.11.06	30.11.06

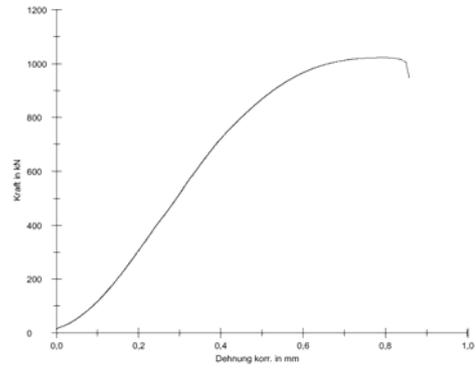


Probewürfel	Betoniert:	Geprüft:
KM-VVPW6 RK01	21.11.06	30.11.06

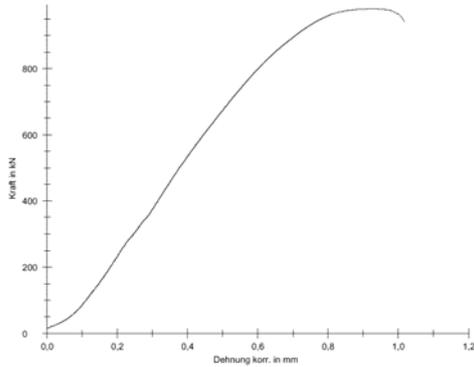
11.1.2 Hauptversuche



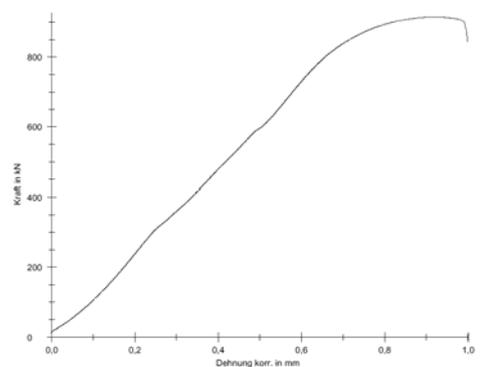
Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW1 RK01 11.12.06 8.1.07



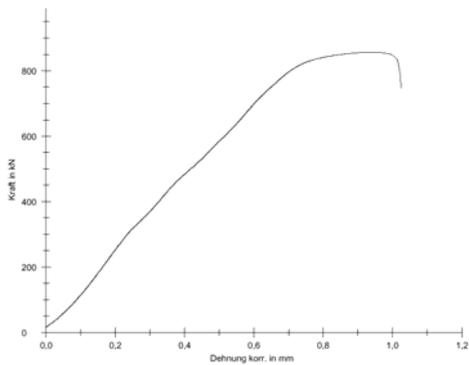
Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW3 RK01 11.12.06 8.1.07



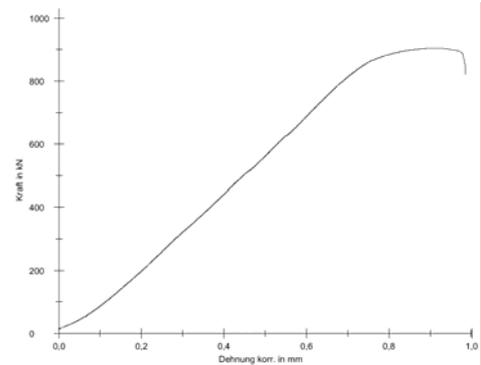
Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW5 RK01 11.12.06 8.1.07



Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW7 RK01 11.12.06 8.1.07

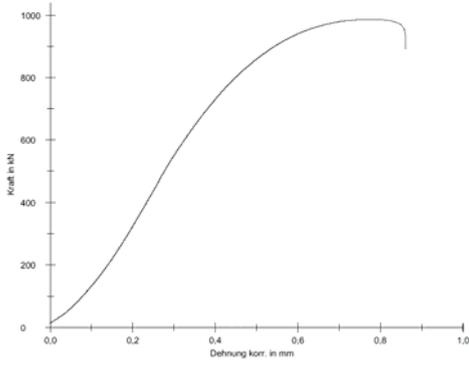


Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW9 RK01 11.12.06 8.1.07

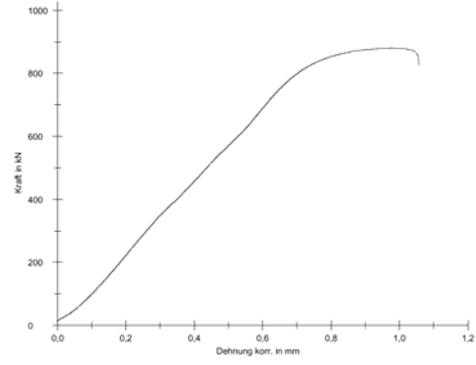


Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW11 RK01 12.12.06 9.1.07

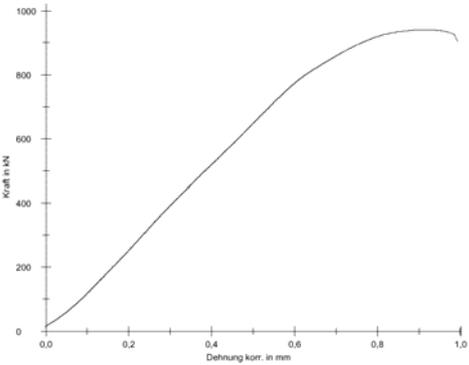
Abhängigkeit des Betontemperaturverhaltens von der Bauteildicke unter Brandbelastung



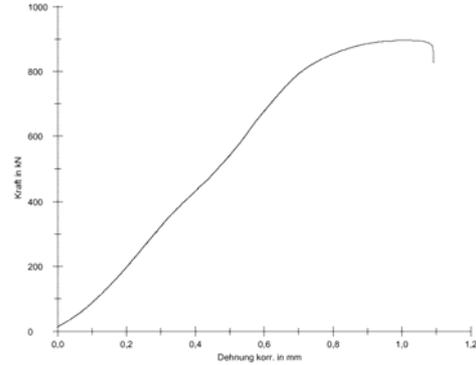
Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW13 RK01 12.12.06 9.1.07



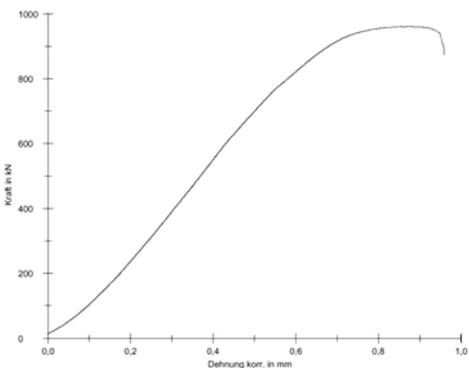
Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW15 RK01 12.12.06 9.1.07



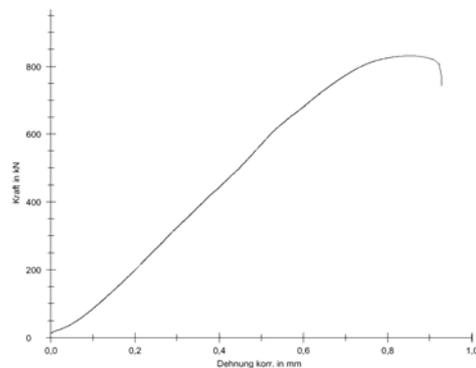
Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW17 RK01 12.12.06 9.1.07



Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW19 RK01 12.12.06 9.1.07

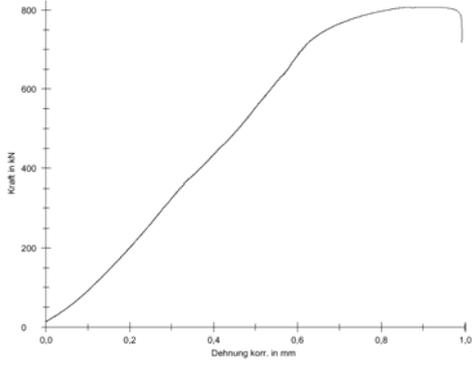


Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW21 RK01 12.12.06 9.1.07

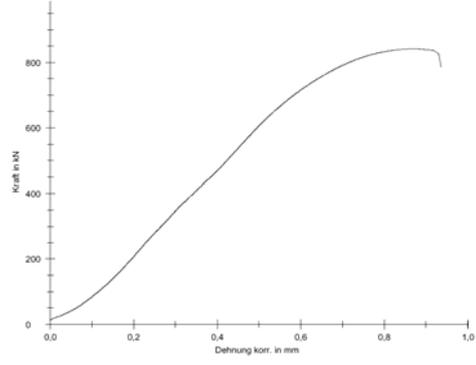


Probewürfel Betontiert: Geprüft:
KM-HVPW23 RK01* 13.12.06 10.1.07

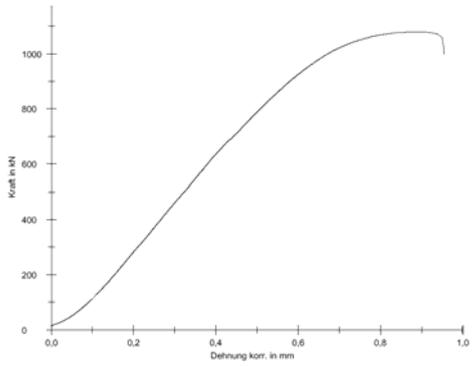
Abhängigkeit des Betontemperaturverhaltens von der Bauteildicke unter Brandbelastung



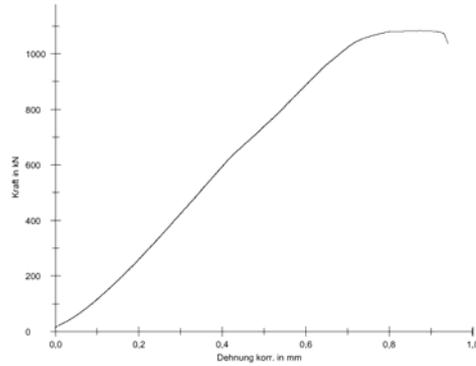
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW25 RK01* 13.12.06 10.1.07



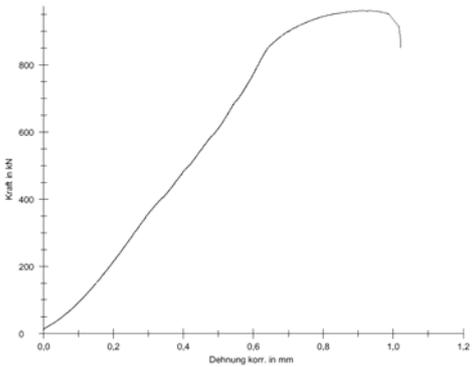
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW26 RK01* 13.12.06 10.1.07



Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW27 RK02 13.12.06 10.1.07



Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW29 RK02 13.12.06 10.1.07



Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW31 RK02 13.12.06 10.1.07

Seriengrafik

Abbildung 11-1 zeigt alle Hauptversuchsdruckversuche in einer zusammenfassenden Darstellung.

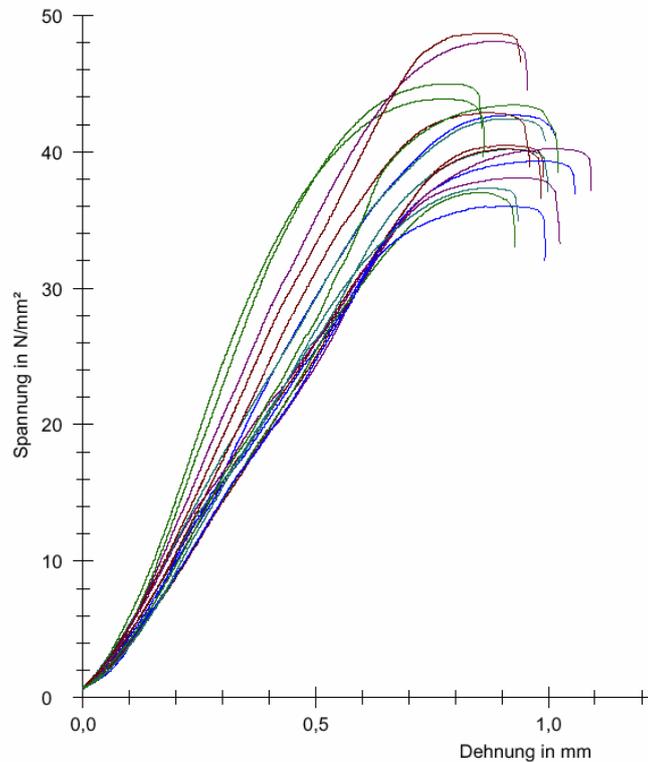
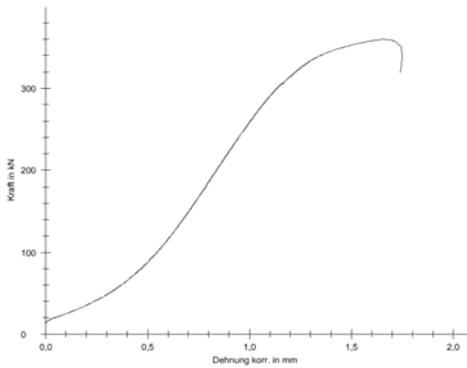


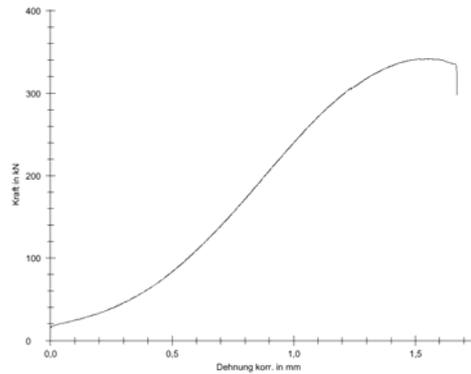
Abbildung 11-1: Seriengrafik Hauptversuchsdruckversuche

Der Mittelwert \bar{x} von σ_m für RK01 (Probekörper mit $1,5 \text{ kg/m}^3$ PP-Fasern) beträgt 41,36, die Standardabweichung s 2,11 und die Varianz s^2 4,43. Für RK01* (Probekörper mit $1,5 \text{ kg/m}^3$ PP-Fasern) beträgt \bar{x} 36,76, s 0,71 und s^2 0,50 – für RK02 (Probekörper ohne PP-Fasern) ergibt sich \bar{x} zu 46,70, s zu 2,88 und die Varianz s^2 zu 8,31.

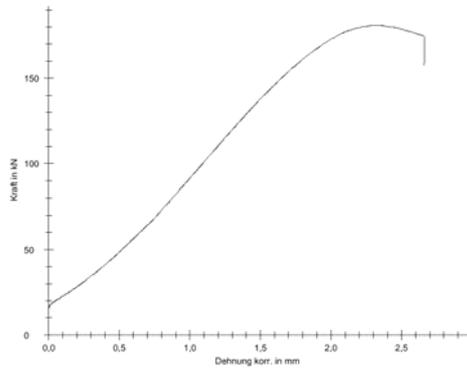
11.1.3 Restfestigkeitsuntersuchungen



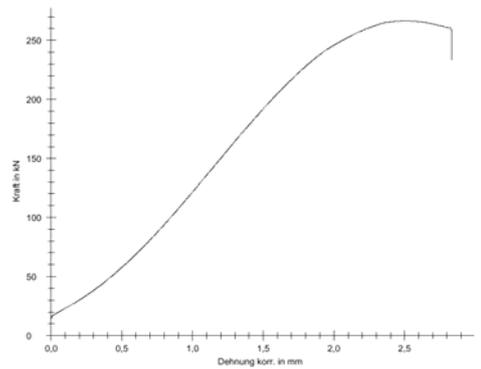
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW2 RK01 11.12.06 9.1.07



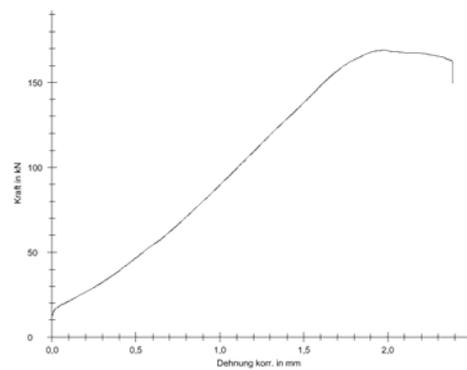
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW4 RK01 11.12.06 9.1.07



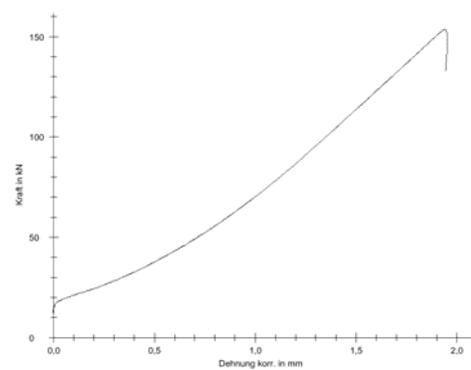
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW8 RK01 11.12.06 9.1.07



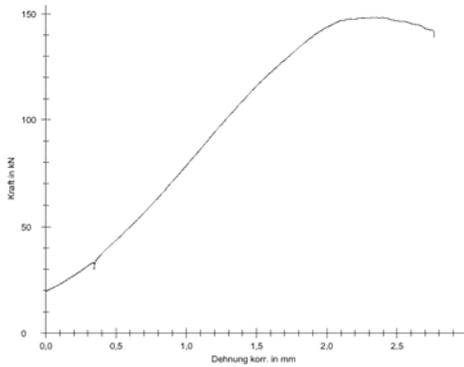
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW10 RK01 11.12.06 9.1.07



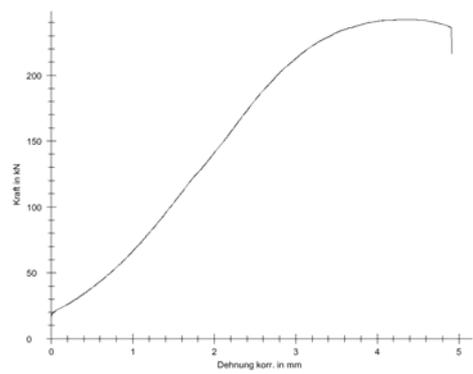
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW6 RK01 11.12.06 9.1.07



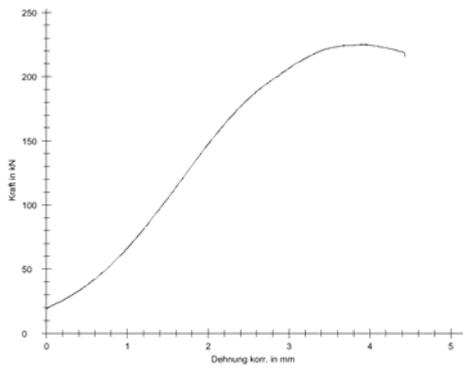
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
 KM-HVPW12 RK01 12.12.06 10.1.07



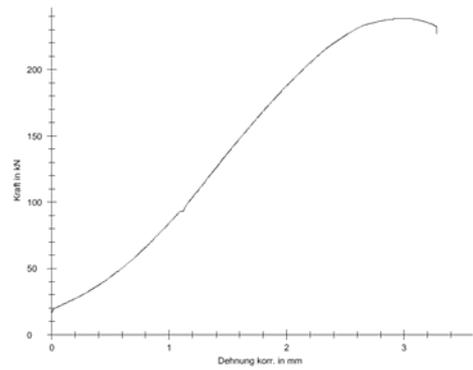
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
KM-HVPW14 RK01 12.12.06 10.1.07



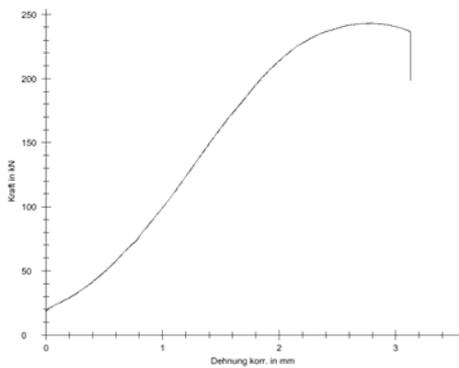
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
KM-HVPW16 RK01 12.12.06 10.1.07



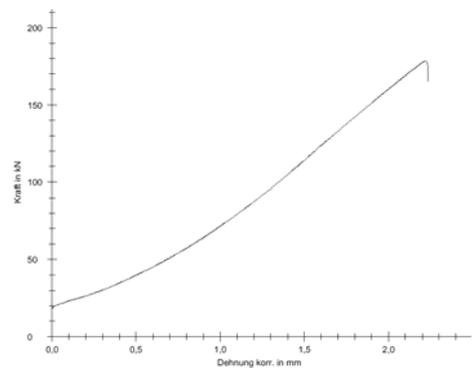
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
KM-HVPW18 RK01 12.12.06 10.1.07



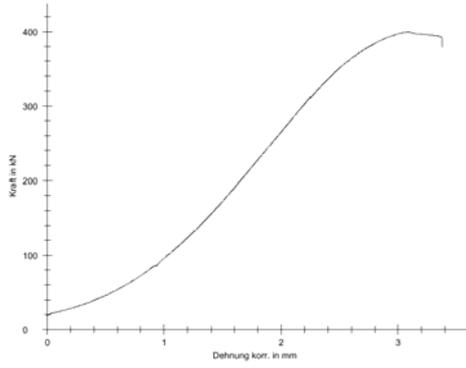
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
KM-HVPW20 RK01 12.12.06 10.1.07



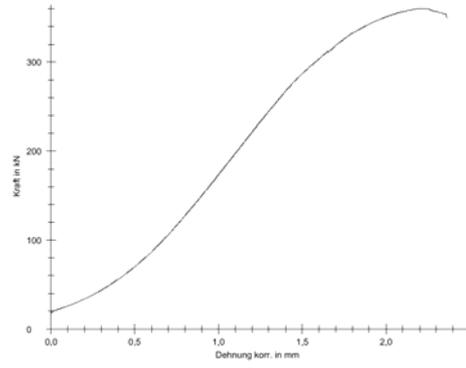
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
KM-HVPW22 RK01* 13.12.06 10.1.07



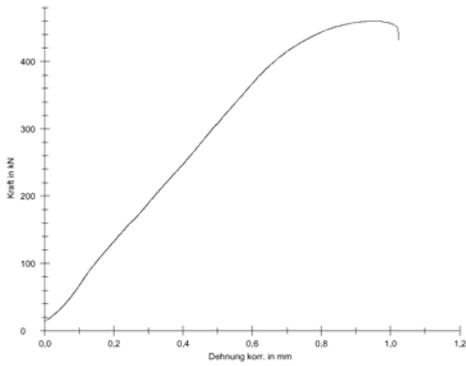
Probewürfel Betoniert: Geprüft:
KM-HVPW24 RK01* 13.12.06 10.1.07



Probewürfel Betontiert: Geprüft:
 KM-HVPW28 RK02 13.12.06 10.1.07



Probewürfel Betontiert: Geprüft:
 KM-HVPW30 RK02 13.12.06 10.1.07



Probewürfel Betontiert: Geprüft:
 KM-HVPW32 RK02 13.12.06 6.3.07

Seriengrafik

Abbildung 11-2 zeigt die zusammenfassende Seriengrafik der Restfestigkeitsdruckversuche.

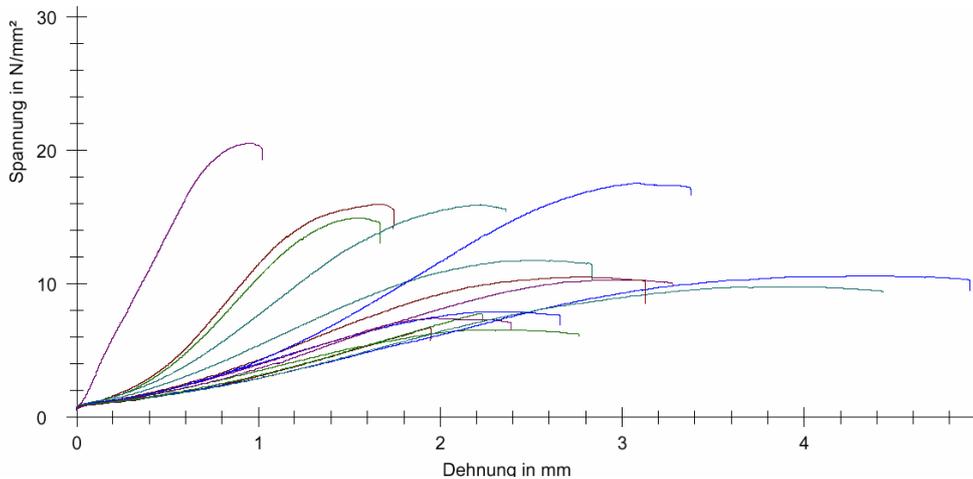


Abbildung 11-2: Seriengrafik Restfestigkeitsuntersuchungen

11.2 Ergänzende Fotodokumentation



Abbildung 11-3: KM-HV8-3 RK01(mit PP-Fasern) nach 1 h, nach 1 d, nach 3 d



Abbildung 11-4: KM-HV16-1 RK01 (mit PP-Fasern) nach Brandversuch, nach 1 h, nach 1 d



Abbildung 11-5: KM-HV16-2 RK01 (mit PP-Fasern) nach Brandversuch, nach 2 h, nach 3 d



Abbildung 11-6: KM-HV16-3 RK01 (mit PP-Fasern) nach Brandversuch, nach 2 h, nach 3 d



Abbildung 11-7: KM-HV12-1 RK01 (mit PP-Fasern) während Brandversuch, nach Brandversuch, nach 2 h



Abbildung 11-8: Brandversuchskörper vom 9.1.2007, nach 3 d

11.3 Simulierte Temperaturverläufe

Die folgenden Temperaturverläufe (Abbildung 11-9 bis Abbildung 11-12) zeigen die MRFC-Simulationsergebnisse der Normalbetonplatten der Dicken 4, 8, 20 und 24cm. Die Interpretation der erhaltenen Temperaturverläufe ist in Kapitel 5.6.1.3 ersichtlich.

Simulation 4 cm dicke Normalbetonplatte, $w = 3,9\%$, Brandkurve: ETK

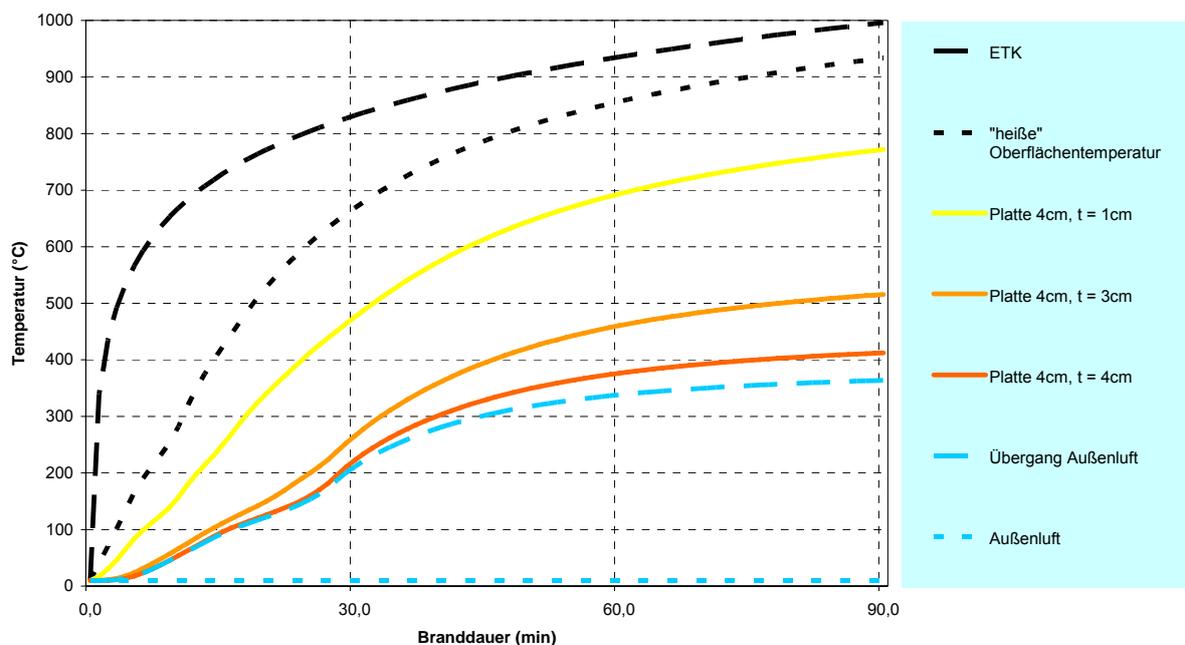


Abbildung 11-9: Simulierten Temperaturverläufe in 4 cm dicken Normalbetonplatten mit $w = 3,9\%$ unter ETK

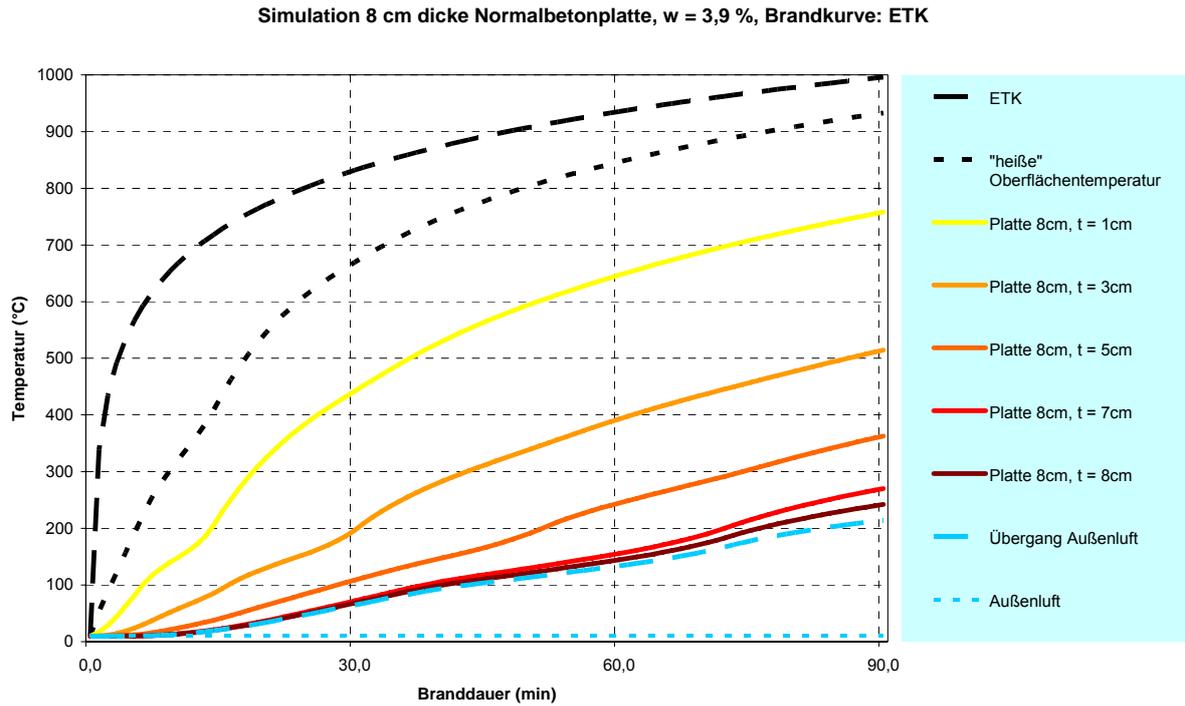


Abbildung 11-10: Simulierten Temperaturverläufe in 8 cm dicken Normalbetonplatten mit $w = 3,9\%$ unter ETK

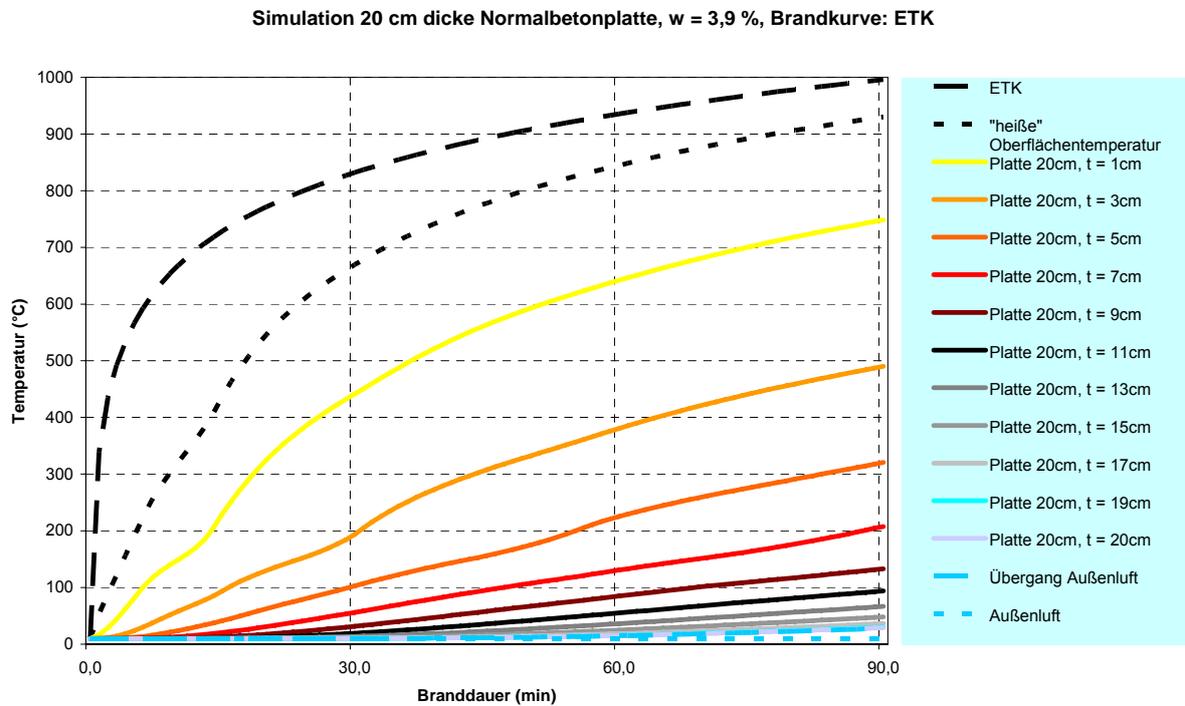


Abbildung 11-11: Simulierten Temperaturverläufe in 20 cm dicken Normalbetonplatten mit $w = 3,9\%$ unter ETK

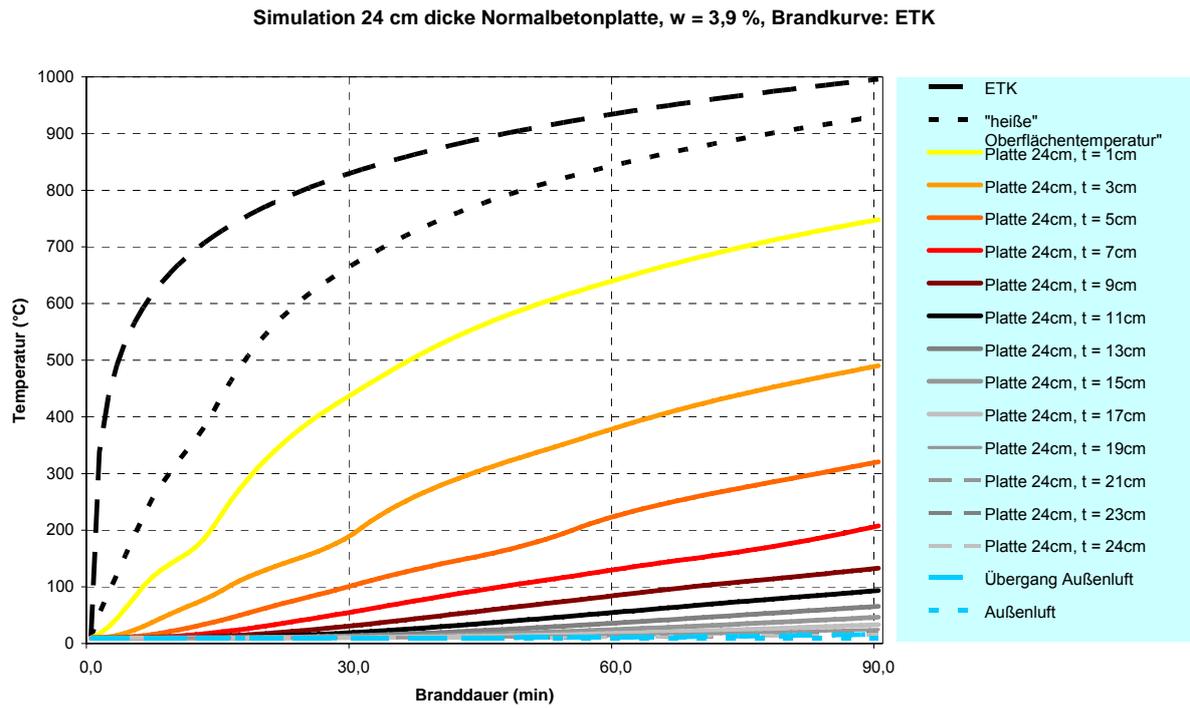


Abbildung 11-12: Simulierten Temperaturverläufe in 24 cm dicken Normalbetonplatten mit w = 3,9 % unter ETK

11.4 Zusammenfassende Datenaufstellung

Tabelle 11-1: Gesamtübersicht Versuchskörper
Probekörper

	Probekörper bzw. Probewürfel	Mischercharge [Itd. Nr.]	RK	Herstellung				Wasserbad		7-Tage-Festigkeit			28-Tage-Festigkeit		
				am	Ausbr.maß d [cm]	Rohdichte [kg/m³]	Luftporen	Einlagerung am	Entnahme am	gemessen am	F _{max} [kN]	Druckfestigkeit [N/mm²]	gemessen am	F _{max} [kN]	Druckfestigkeit [N/mm²]
Vorversuche	KM-VV12-1	Charge 1	RK 01	20.11.06	76	2318,8	2,1	21.11.06	28.11.06	-	-	-	-	-	-
	KM-VVPW1									-	-	-			
	KM-VVPW2									30.11.06	760,22	33,34			
	KM-VV12-1 f	Charge 2	RK 01	20.11.06	75	2331,3	2,3	21.11.06	28.11.06	-	-	-	-	-	-
	KM-VV12-2									-	-	-			
	KM-VVPW3									30.11.06	696,02	30,43			
	KM-VV12-3	Charge 3	RK 01	20.11.06	71	2331,3	2,3	21.11.06	28.11.06	-	-	-	-	-	-
	KM-VVPW5									30.11.06	737,63	32,76			
	KM-VVPW6									30.11.06	744,68	33,07			
Hauptversuche	KM-HV8-1	Charge 1	RK 01	11.12.06	56	2368,8	2,3	12.12.06	19.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV16-1									-	-	-	08.01.07	909,05	40,43
	KM-HVPW1									-	-	-	-	-	-
	KM-HV16-1 f	Charge 2	RK 01	11.12.06	57	2343,8	2,4	12.12.06	19.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV8-2									-	-	-	08.01.07	1022,60	44,97
	KM-HVPW3									-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW4	Charge 3	RK 01	11.12.06	55	-	-	12.12.06	19.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV16-2									-	-	-	08.01.07	980,30	42,66
	KM-HVPW5									-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW6	Charge 4	RK 01	11.12.06	-	-	-	12.12.06	19.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV8-3									-	-	-	08.01.07	913,77	40,16
	KM-HV16-3									-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW7	Charge 5	RK 01	11.12.06	-	-	-	12.12.06	19.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV16-3 f									-	-	-	08.01.07	856,06	38,05
	KM-HVPW9									-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW10	Charge 6	RK 01	12.12.06	-	-	-	13.12.06	20.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV20-1									-	-	-	09.01.07	904,32	40,19
	KM-HVPW11									-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW12	Charge 7	RK 01	12.12.06	-	-	-	13.12.06	20.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV20-1 f									-	-	-	09.01.07	985,99	43,84
	KM-HV20-2									-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW13	Charge 8	RK 01	12.12.06	-	-	-	13.12.06	20.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV20-2 f									-	-	-	09.01.07	880,18	39,29
	KM-HVPW15									-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW16	Charge 9	RK 01	12.12.06	-	-	-	13.12.06	20.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV20-3									-	-	-	09.01.07	939,98	42,38
	KM-HVPW17									-	-	-	-	-	-
	KM-HV20-3 f	Charge 10	RK 01	12.12.06	-	-	-	13.12.06	20.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV12-1									-	-	-	09.01.07	896,77	40,18
	KM-HVPW19									-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW20	Charge 11	RK 01*	13.12.06	53	2387,5	7	14.12.06	21.12.06	-	-	-	-	-	-
	KM-HV12-2 RK01*									-	-	-	10.01.07	830,82	39,79
	KM-HVPW22									-	-	-	-	-	-
KM-HVPW23	Charge 12	RK 01*	13.12.06	53	2362,5	7	14.12.06	21.12.06	-	-	-	-	-	-	
KM-HV12-3 RK01*									-	-	-	10.01.07	807,09	35,97	
KM-HVPW24									-	-	-	10.01.07	842,10	37,33	
KM-HVPW25	Charge 13	RK 02	13.12.06	53	2362,5	2,9	14.12.06	21.12.06	-	-	-	-	-	-	
KM-HVPW26									-	-	-	10.01.07	1079,06	48,05	
KM-HV12-1 RK02									-	-	-	-	-	-	
KM-HVPW27	Charge 14	RK 02	13.12.06	52	2356,3	3,1	14.12.06	21.12.06	-	-	-	-	-	-	
KM-HV12-2 RK02									-	-	-	10.01.07	1083,10	48,66	
KM-HVPW29									-	-	-	-	-	-	
KM-HVPW30	Charge 15	RK 02	13.12.06	-	-	-	14.12.06	21.12.06	-	-	-	-	-	-	
KM-HV12-3 RK02									-	-	-	10.01.07	961,00	43,39	
KM-HVPW31									-	-	-	-	-	-	
KM-HVPW32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

Tabelle 11-2: Gesamtübersicht Versuchskörper (Fortsetzung)

Probekörper (Fortsetzung)

	Probekörper bzw. Probewürfel	Brandversuch				Körpermassen				Wassergehalt			
		Brandversuch	Brandversuch am	Brandversuchsbeginn	Brandversuchsende	vor Brand [kg]	nach Brand [kg]	Masseverlust [%]	Anmerkung	m _{feuchte} [g]	Trockenzeit bei 105 °C [h]	m _{trocken} [g]	Masseverlust [%]
Vorversuche	KM-VV12-1	I	06.12.06	15:10	15:43	83,20	81,95	-1,50		-	-	-	-
	KM-VVPW1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KM-VVPW2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KM-VV12-1 f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KM-VV12-2	II	06.12.06	16:04	16:36	85,70	84,25	-1,69		231,0	24 h	220,5	-4,55
	KM-VVPW3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KM-VVPW4	-	-	-	-	-	-	-	-	232,0	24 h	223,5	-3,66
	KM-VV12-3	I	06.12.06	15:10	15:43	86,50	84,85	-1,91		-	-	-	-
KM-VVPW5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
KM-VVPW6	-	-	-	-	-	-	-	-	281,5	24 h	271,0	-3,73	
Hauptversuche	KM-HV8-1	I	08.01.07	11:10	11:45	53,50	51,30	-4,11		-	-	-	-
	KM-HV16-1	II	08.01.07	12:14	13:19	114,60	109,40	-4,54	Abplatzungen	-	-	-	-
	KM-HVPW1	-	-	-	-	-	-	-	-	55,5	24 h	53,5	-3,60
	KM-HVPW2	I	08.01.07	11:10	11:45	7,55	6,85	-9,27		-	-	-	-
	KM-HV16-1 f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KM-HV8-2	I	08.01.07	11:10	11:45	55,55	53,20	-4,23		-	-	-	-
	KM-HVPW3	-	-	-	-	-	-	-	-	163,5	24 h	157,0	-3,98
	KM-HVPW4	I	08.01.07	11:10	11:45	7,70	7,05	-8,44		-	-	-	-
	KM-HV16-2	III	09.01.07	10:25	11:15	112,60	109,45	-2,80		-	-	-	-
	KM-HVPW5	-	-	-	-	-	-	-	-	115,5	24 h	111,0	-3,90
	KM-HVPW6	III	09.01.07				7,75	6,90	-10,97		-	-	-
	KM-HV8-3	II	08.01.07	12:14	13:19	58,85	54,30	-7,73		-	-	-	-
	KM-HV16-3	III	09.01.07	10:25	11:15	112,75	109,50	-2,88		-	-	-	-
	KM-HVPW7	-	-	-	-	-	-	-	-	354,0	24 h	337,5	-4,66
	KM-HVPW8	II	08.01.07	12:14	13:19	7,70	6,55	-14,94		-	-	-	-
	KM-HV16-3 f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW9	-	-	-	-	-	-	-	-	109,5	24 h	105,5	-3,65
	KM-HVPW10	II	08.01.07	12:14	13:19	7,85	6,65	-15,29		-	-	-	-
	KM-HV20-1	IV	09.01.07	11:47	12:33	139,15	135,20	-2,84		-	-	-	-
	KM-HVPW11	-	-	-	-	-	-	-	-	72,0	72 h	69,5	-3,47
	KM-HVPW12	IV	09.01.07	11:47	12:33	7,65	6,65	-13,07		-	-	-	-
	KM-HV20-1 f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KM-HV20-2	V	09.01.07	13:20	14:05	138,15	134,40	-2,71		-	-	-	-
	KM-HVPW13	-	-	-	-	-	-	-	-	49,0	72 h	47,0	-4,08
	KM-HVPW14	IV	09.01.07	11:47	12:33	7,60	6,60	-13,16		-	-	-	-
	KM-HV20-2 f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KM-HVPW15	-	-	-	-	-	-	-	-	109,5	72 h	106,0	-3,20
	KM-HVPW16	V	09.01.07	13:20	14:05	7,75	6,70	-13,55		-	-	-	-
	KM-HV20-3	V	09.01.07	13:20	14:05	138,20	131,15	-5,10	Abplatzungen	-	-	-	-
	KM-HVPW17	-	-	-	-	-	-	-	-	51,0	72 h	49,5	-2,94
	KM-HVPW18	V	09.01.07	13:20	14:05	7,65	6,60	-13,73		-	-	-	-
	KM-HV20-3 f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KM-HV12-1	IV	09.01.07	11:47	12:33	81,85	78,65	-3,91		-	-	-	-	
KM-HVPW19	-	-	-	-	-	-	-	-	108,0	72 h	103,5	-4,17	
KM-HVPW20	VI	09.01.07	14:31	15:16	7,55	6,70	-11,26		-	-	-	-	
KM-HVPW21	-	-	-	-	-	-	-	-	106,5	72 h	102,0	-4,23	
KM-HV12-2 RK01*	VI	09.01.07	14:31	15:16	78,70	75,84	-3,63		-	-	-	-	
KM-HVPW22	VI	09.01.07	14:31	15:16	7,55	6,70	-11,26		-	-	-	-	
KM-HVPW23	-	-	-	-	-	-	-	-	103,0	48 h	99,5	-3,40	
KM-HV12-3 RK01*	VI	09.01.07	14:31	15:16	81,05	77,65	-4,19		-	-	-	-	
KM-HVPW24	VI	09.01.07	14:31	15:16	7,35	6,45	-12,24		-	-	-	-	
KM-HVPW25	-	-	-	-	-	-	-	-	65,0	48 h	62,0	-4,62	
KM-HVPW26	-	-	-	-	-	-	-	-	141,5	48 h	136,0	-3,89	
KM-HV12-1 RK02	VII	09.01.07	15:40	16:33	81,55	78,05	-4,29	Abplatzungen	-	-	-	-	
KM-HVPW27	-	-	-	-	-	-	-	-	99,0	48 h	95,5	-3,54	
KM-HVPW28	VII	09.01.07	15:40	16:33	7,80	6,95	-10,90	Abplatzungen	-	-	-	-	
KM-HV12-2 RK02	VII	09.01.07	15:40	16:33	86,05	83,15	-3,37	Abplatzungen	-	-	-	-	
KM-HVPW29	-	-	-	-	-	-	-	-	165,0	48 h	159,0	-3,64	
KM-HVPW30	VII	09.01.07	15:40	16:33	7,85	6,85	-12,74	Abplatzungen	-	-	-	-	
KM-HV12-3 RK02	VIII	15.01.07	12:00	12:46	83,55	80,20	-4,01	Abplatzungen	-	-	-	-	
KM-HVPW31	-	-	-	-	-	-	-	-	83,0	48 h	80,0	-3,61	
KM-HVPW32	VIII	15.01.07	12:00	12:46	7,80	5,50	-29,49	Teil abgeplatzt	-	-	-	-	