



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la
communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle
comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen

**Facteurs d'influence sur la résistance au feu de
structures en béton**

Influences on the Fire Resistance of Concrete Structures

**VersuchsStollen Hagerbach AG
Dr. Erik Iglesias
Dipl. Ing. Volker Wetzig**

**Forschungsauftrag FGU 2003/004 auf Antrag der
Fachgruppe für Untertagbau (FGU)**

Februar 2009

1249

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht werden die Ergebnisse systematischer Untersuchungen des Einflusses der Porosität und der Prüfkörpersteifigkeit auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen dargestellt.

In der Literatur und unter Experten wird die Meinung vertreten, dass durch eine richtige Wahl der Porosität der Brandwiderstand einer Konstruktion positiv beeinflusst werden kann. Mit den vorliegenden Untersuchungen wurden der Einfluss der Porosität sowie die Abhängigkeit des Brandwiderstands von der Prüfkörpergeometrie und damit der Prüfkörpersteifigkeit ermittelt.

Als Steuergrösse wird der w/z -Wert verwendet. Zeigt sich eine Steuerbarkeit des Brandwiderstands durch den w/z -Wert ist dies für die Praxis von hoher Bedeutung.

In der ersten Versuchsserie konnte eine Abhängigkeit des Brandwiderstandes von den Varianten w/z Wert und Luftporengehalt verifiziert werden. Mit steigendem w/z -Wert und steigendem Luftporengehalt steigerte sich der Brandwiderstand der untersuchten Betonmuster.

In einer zweiten Versuchsserie wurde mit identischen Betonrezepturen der Einfluss der Prüfkörpersteifigkeit ermittelt. Es zeigte sich, dass in steiferen Prüfkörpern die Rissbildung, über die ein Teil des Wasserdampfes entweichen kann, behindert ist und es zu vermehrten Abplatzungen kommt. Die Abplatzrate nimmt jedoch mit zunehmender Porosität wiederum ab.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind nun in die Prüf- und Baupraxis zu überführen und durch eine umfangreichere Versuchsreihe statistisch abzusichern. Auch gilt es nun Konstruktionsregeln für ein brandwiderstandsfesteres Bauen zu entwerfen und diese durch Versuche zu beweisen. Die Prüfnormen sind hinsichtlich der Prüfkörpergeometrie zu überarbeiten.

SUMMARY

This report presents the results from systematic investigations of porosity and of the rigidity of test specimens in relation to the fire resistance of concrete structures.

In the literature and among experts, the opinion has been advanced that the correct choice of porosity can positively influence a structure's fire resistance. The present investigations determined the influence of porosity and the dependence of fire resistance on the geometry of the test specimen, and hence on the specimen's rigidity.

The w/z value is used as the control variable. Evidence of controllability of fire resistance by the w/z value is of great importance for practice.

In the first series of tests, it was possible to verify the dependency of fire resistance on two variants: w/z value and air pore content. As the w/z value and the air pore content increased, there was also an increase in the fire resistance of the concrete specimens under examination.

The influence of the rigidity of test specimens was determined in a second series of tests using identical concrete recipes. It became apparent that the formation of

cracks through which part of the water vapour can escape is impeded in more rigid test specimens, and more instances of explosive spalling occur. However, the explosive spalling rate decreases again as the porosity increases.

The knowledge acquired must now be implemented in testing and building practice, and must be underpinned by a series of statistical tests. Also, design rules for building with greater fire resistance should now be drafted and proven by means of tests. The testing standards should be revised in respect of the geometry of test specimens.

RECAPITULATIF

Dans ce compte-rendu sont présentés les résultats d'analyses systématiques de la porosité et de la rigidité des éprouvettes en liaison avec la résistance au feu de structures en béton.

L'une des opinions formulées dans la littérature et parmi les experts est qu'on peut influencer favorablement sur la résistance au feu d'une structure en choisissant la porosité adéquate. Dans les présentes analyses, on a déterminé l'influence de la porosité et le lien entre la résistance au feu et la géométrie de l'éprouvette, et par conséquent la rigidité de l'éprouvette.

La valeur d'influence qui a été adoptée est la valeur eau/ciment. Si on peut faire varier la résistance au feu en modifiant la valeur eau/ciment, cela revêt une grande importance dans la pratique.

Dans la première série d'essais, on a pu vérifier que la résistance au feu variait en fonction des variantes « valeur eau/ciment » et « pourcentage d'air occlus dans le béton ». Plus la valeur eau/ciment et le pourcentage d'air occlus dans le béton augmentent, plus la résistance au feu des échantillons de béton analysés s'accroît.

Dans une deuxième série d'essais, on a déterminé l'influence de la rigidité de l'éprouvette en utilisant des formulations de béton identiques. Il s'est avéré que sur les éprouvettes plus rigides, la formation de fissures par lesquelles une partie de la vapeur d'eau peut s'évaporer était empêchée, et qu'il en résultait un écaillage accru. Néanmoins, le pourcentage d'écaillage diminue à nouveau à mesure que la porosité augmente.

Les connaissances ainsi acquises doivent désormais être appliquées dans la pratique des essais et de la construction, et validées par une série d'essais statistiques. Il convient également d'élaborer des règles de construction permettant de construire d'une manière plus résistante au feu, et d'attester ces règles par des essais. Les normes d'essai devront être remaniées au niveau de la géométrie des éprouvettes.

Inhalt	Seite
1. Einleitung	6
2. Zielsetzung und Vorgehensweise	7
3. Stand der Technik	8
3.1. Primär- und Sekundärliteratur	8
3.2. Untersuchungen im VersuchsStollen Hagerbach	8
3.3. Zusammenfassung	9
4. Untersuchungsprogramm	10
4.1. Einleitung	10
4.2. Versuchsparameter	10
4.2.1. Einleitung	10
4.2.2. Ofentemperatur	10
4.2.3. Porosität	11
4.2.4. Prüfkörperfeuchte	11
4.2.5. Zuschlagstoffe	12
4.2.6. Prüfkörpersteifigkeit	12
4.3. Versuchsaufbau	12
4.3.1. Versuchsofen	12
4.3.2. Versuchsplanung	13
4.3.2.1. Allgemein	13
4.3.2.2. Versuchsserie 1 Einfluss der Porosität in Abhängigkeit des w/z Werts	13
4.3.2.3. Versuchsserie 2 Einfluss der Prüfkörpergeometrie und –steifigkeit in Abhängigkeit des w/z-Wertes	14
4.4. Auswertungsmethodik	14
4.5. Zusammenfassung Untersuchungsprogramm	16
5. Versuchsdurchführung	17
5.1. Herstellen der Prüfkörper	17
5.1.1. Betongüte	17
5.1.2. Prüfkörperaufbau	18
5.2. Brandprüfungen	19
5.2.1. Versuchsnomenklatur	19
5.2.2. Versuchsserie 1 Einfluss der Porosität in Abhängigkeit des w/z-Wertes	20
5.2.2.1. Einleitung	20
5.2.2.2. Prüfkörper Mix 1, Prüfkörperdicke d=150 mm	20
5.2.2.3. Prüfkörper Mix 2, Prüfkörperdicke d=150 mm	21
5.2.2.4. Prüfkörper Mix 3, Prüfkörperdicke d=150 mm	22
5.2.2.5. Prüfkörper Mix 4, Prüfkörperdicke d=150 mm	23
5.2.2.6. Fazit und Folgerungen für die weitere Vorgehensweise	24
5.2.3. Versuchsserie 2 Einfluss der Prüfkörpergeometrie und -steifigkeit auf den Brandwiderstand in Abhängigkeit des w/z-Wertes	25
5.2.3.1. Einleitung	25

5.2.3.2. Prüfkörper Mix 1, Prüfkörperdicke d=350 mm	25
5.2.3.3. Prüfkörper Mix 2, Prüfkörperdicke d=350 mm	26
5.2.3.4. Prüfkörper Mix 3, Prüfkörperdicke d=350 mm	27
5.2.3.5. Prüfkörper Mix 4, Prüfkörperdicke d=350 mm	28
5.2.4. Fazit der Brandprüfungen	29
5.3. Bestimmung der Betoncharakteristika	30
5.3.1. Feuchtigkeitsbestimmung	30
5.3.1.1. Abhängigkeit der Feuchtigkeit von der Bestimmungsmethode	30
5.3.1.2. Relative Feuchtigkeiten der Prüfkörper	32
5.3.2. Bohrkerndruckfestigkeit	32
5.3.3. Porosität	33
6. Zusammenfassung und Diskussion der Resultate	34
7. Ausblick	36
8. Literatur	37
8.1. Externe Quellen	37
8.2. Veröffentlichungen der VersuchsStollen Hagerbach AG	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ZTV Temperatur-Zeit-Kurve für die Ofensteuerung im Vergleich mit RWS- und ISO-Kurve.....	11
Abbildung 2: Derzeitiger Prüfofen im Versuchstollen Hagerbach.....	13
Abbildung 3: Auswertemethodik	15
Abbildung 4: Herstellen der Prüfkörper.....	17
Abbildung 5: Skizze der Prüfkörperschalung.....	18
Abbildung 6: Detail Dehnungsbehinderung Prüfkörper der Versuchsserie 2	19
Abbildung 7: Stahlrahmen zur Dehnungsbehinderung und zugleich als Schalung	19
Abbildung 8: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 1 mit d=150 mm	20
Abbildung 9: Prüfkörper Mix 1 mit d=150 mm nach der Brandprüfung.....	21
Abbildung 10: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 2 mit d=150 mm	21
Abbildung 11: Prüfkörper Mix 2 mit d=150 mm nach der Brandprüfung.....	22
Abbildung 12: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 3	22
Abbildung 13: Prüfkörper Mix 3 mit d=150 mm nach der Brandprüfung.....	23
Abbildung 14: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 4	23
Abbildung 15: Prüfkörper Mix 4 mit d=150 mm nach der Brandprüfung.....	24
Abbildung 16: Abhängigkeit des Brandwiderstands vom w/z Wert und Luftporengehalt.....	24
Abbildung 17: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 1	25
Abbildung 18: Prüfkörper Mix 1 mit d=350 mm nach der Brandprüfung.....	26
Abbildung 19: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 2	26
Abbildung 20: Prüfkörper Mix 2 mit d=350 mm nach der Brandprüfung.....	27
Abbildung 21: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 3	27
Abbildung 22: Prüfkörper Mix 3 mit d=350 mm nach der Brandprüfung.....	28
Abbildung 23: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 4	28
Abbildung 24: Prüfkörper Mix 4 mit d=350 mm nach der Brandprüfung.....	29
Abbildung 25: Vergleich der Erkenntnisse der Versuchsserien 1 und 2.....	29
Abbildung 26: rel. Feuchtigkeiten in Abhängigkeit der Gewinnungsmethode.....	31
Abbildung 27: Probengewinnung durch Herausspitzen (li) und durch Bohrkernentnahme (re)	31
Abbildung 28: Bohrkerndruckfestigkeiten	32
Abbildung 29: Porositäten der Prüfkörper.....	33
Abbildung 30: Einfluss der Dehnungsbehinderung auf die Abplatzrate.....	34
Abbildung 31: Prüfkörper Mix 2 nach der Brandprüfung, links mit d=150 mm und rechts mit d=350 mm	35

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht werden die Ergebnisse systematischer Untersuchungen des Einflusses der Porosität und der Prüfkörpersteifigkeit auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen dargestellt.

In der Literatur und unter Experten wird die Meinung vertreten, dass durch eine richtige Wahl der Porosität der Brandwiderstand einer Konstruktion positiv beeinflusst werden kann. Mit den vorliegenden Untersuchungen wurden der Einfluss der Porosität sowie die Abhängigkeit des Brandwiderstands von der Prüfkörpergeometrie und damit der Prüfkörpersteifigkeit ermittelt.

Als Steuergrösse wird der w/z -Wert verwendet. Zeigt sich eine Steuerbarkeit des Brandwiderstands durch den w/z -Wert ist dies für die Praxis von hoher Bedeutung.

In der ersten Versuchsserie konnte eine Abhängigkeit des Brandwiderstandes von den Varianten w/z Wert und Luftporengehalt verifiziert werden. Mit steigendem w/z -Wert und steigendem Luftporengehalt steigerte sich der Brandwiderstand der untersuchten Betonmuster.

In einer zweiten Versuchsserie wurde mit identischen Betonrezepturen der Einfluss der Prüfkörpersteifigkeit ermittelt. Es zeigte sich, dass in steiferen Prüfkörpern die Rissbildung, über die ein Teil des Wasserdampfes entweichen kann, behindert ist und es zu vermehrten Abplatzungen kommt. Die Abplatzrate nimmt jedoch mit zunehmender Porosität wiederum ab.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind nun in die Prüf- und Baupraxis zu überführen und durch eine umfangreichere Versuchsreihe statistisch abzusichern. Auch gilt es nun Konstruktionsregeln für ein brandwiderstandsfesteres Bauen zu entwerfen und diese durch Versuche zu beweisen. Die Prüfnormen sind hinsichtlich der Prüfkörpergeometrie zu überarbeiten.

SUMMARY

This report presents the results from systematic investigations of porosity and of the rigidity of test specimens in relation to the fire resistance of concrete structures.

In the literature and among experts, the opinion has been advanced that the correct choice of porosity can positively influence a structure's fire resistance. The present investigations determined the influence of porosity and the dependence of fire resistance on the geometry of the test specimen, and hence on the specimen's rigidity.

The w/z value is used as the control variable. Evidence of controllability of fire resistance by the w/z value is of great importance for practice.

In the first series of tests, it was possible to verify the dependency of fire resistance on two variants: w/z value and air pore content. As the w/z value and the air pore content increased, there was also an increase in the fire resistance of the concrete specimens under examination.

The influence of the rigidity of test specimens was determined in a second series of tests using identical concrete recipes. It became apparent that the formation of cracks through which part of the water vapour can escape is impeded in more rigid test specimens, and more instances of explosive spalling occur. However, the explosive spalling rate decreases again as the porosity increases.

The knowledge acquired must now be implemented in testing and building practice, and must be underpinned by a series of statistical tests. Also, design rules for building with greater fire resistance should now be drafted and proven by means of tests. The testing standards should be revised in respect of the geometry of test specimens.

RECAPITULATIF

Dans ce compte-rendu sont présentés les résultats d'analyses systématiques de la porosité et de la rigidité des éprouvettes en liaison avec la résistance au feu de structures en béton.

L'une des opinions formulées dans la littérature et parmi les experts est qu'on peut influencer favorablement sur la résistance au feu d'une structure en choisissant la porosité adéquate. Dans les présentes analyses, on a déterminé l'influence de la porosité et le lien entre la résistance au feu et la géométrie de l'éprouvette, et par conséquent la rigidité de l'éprouvette.

La valeur d'influence qui a été adoptée est la valeur eau/ciment. Si on peut faire varier la résistance au feu en modifiant la valeur eau/ciment, cela revêt une grande importance dans la pratique.

Dans la première série d'essais, on a pu vérifier que la résistance au feu variait en fonction des variantes « valeur eau/ciment » et « pourcentage d'air occlus dans le béton ». Plus la valeur eau/ciment et le pourcentage d'air occlus dans le béton augmentent, plus la résistance au feu des échantillons de béton analysés s'accroît.

Dans une deuxième série d'essais, on a déterminé l'influence de la rigidité de l'éprouvette en utilisant des formulations de béton identiques. Il s'est avéré que sur les éprouvettes plus rigides, la formation de fissures par lesquelles une partie de la vapeur d'eau peut s'évaporer était empêchée, et qu'il en résultait un écaillage accru. Néanmoins, le pourcentage d'écaillage diminue à nouveau à mesure que la porosité augmente.

Les connaissances ainsi acquises doivent désormais être appliquées dans la pratique des essais et de la construction, et validées par une série d'essais statistiques. Il convient également d'élaborer des règles de construction permettant de construire d'une manière plus résistante au feu, et d'attester ces règles par des essais. Les normes d'essai devront être remaniées au niveau de la géométrie des éprouvettes.

1. Einleitung

Beim Neubau oder der Sanierung unterirdischer Verkehrsinfrastruktur ist im Rahmen von Sicherheitsanalysen festzulegen, mit welchen Massnahmen das Bauwerk gegen Brandeinwirkung geschützt werden kann. Erste Schadensbilder werden in Form von Abplatzungen des Betons zu erwarten sein. Mit zunehmender Branddauer werden auch die zulässigen Temperaturgrenzwerte für die Armierung und den Beton überschritten werden.

Es bietet sich eine Vielzahl von Schutzmöglichkeiten an, die sich in den Kosten unterscheiden.

Neben „brandbeständigem“ Beton und einer thermischen Barriere, wird in der Literatur und unter Experten auch die Meinung vertreten, dass durch eine richtige Wahl der Porosität der Brandwiderstand einer Konstruktion positiv beeinflusst werden kann. Der Begriff Porosität bezeichnet hier die effektive Porosität. Diese ist als Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen definiert, unabhängig davon ob die Poren miteinander verbunden sind oder nicht. Die Verbindungen der Poren untereinander, allgemein als Wegigkeit bezeichnet, sind entscheidend für die Bewegung des Wassers/Dampfes und damit für das Abplatzverhalten.

Die Porosität wird primär über den w/z-Wert gesteuert. Somit könnte diese Massnahme die wirtschaftlich günstigste Lösung für alle Fälle darstellen, in denen die Bauteile nicht auf eine maximale Brandlast, wie sie in den einschlägigen Normen definiert wird, dimensioniert werden müssen.

Über die zu erreichende Porosität existieren unterschiedliche Meinungen, die jeweils nachvollziehbar begründet werden. Einerseits wird eine hohe Porosität verlangt damit der im Brandfall entstehende Wasserdampf entweichen kann, andererseits wird im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit eine niedrige Porosität gefordert.

Die langjährigen Erfahrungen mit akkreditierten Brandprüfungen im Versuchsstollen Hagerbach haben gezeigt, dass in erster Linie Expansionsvolumen für den Wasserdampf geschaffen werden müssen um ein Abplatzen zu verhindern. Für eine fundierte Beurteilung sind systematische Untersuchungen erforderlich, die im Folgenden vorgeschlagen werden. Damit soll gezeigt werden, mit welchen einfachen und kostengünstigen Massnahmen ein erhöhter Brandschutz bei Betonbauteilen erreicht werden kann.

2. Zielsetzung und Vorgehensweise

In einem Tunnel entstehen im Brandfall viel höhere Temperaturen als z.B. im Hochbau, und dies spiegelt sich auch in den vorgegeben Temperatur-Zeit-Kurven für standardisierte Prüfungen wieder. Deshalb wird diese Untersuchung auf unterirdische Verkehrsanlagen beschränkt.

Es werden grundsätzlich kritische Bauteile betrachtet, die bei einer Schwächung, z.B. durch Abplatzungen, einer hohen Einsturzgefahr ausgesetzt sind. Bei Tunnelanlagen sind dies zum einen Zwischendecken, die den Fahrraum gegenüber dem Lüftungskanal abgrenzen und nur eine geringe Bauteildicke aufweisen, und zum anderen die Gesamtstruktur eines Tunnels, die kollabieren kann. Dies kann besonders in Lockergesteinsbereichen und bei Unterwassertunneln unabsehbare Folgen nach sich ziehen.

Betonqualitäten im Portalbereich weisen oft eine erhöhte Frostbeständigkeit durch einen erhöhten Luftporengehalt auf. Sollten sich im Rahmen der Untersuchungen bestätigen, dass die Erhöhung des Luftporengehaltes auch zu einer Erhöhung des Brandwiderstandes führt, lassen sich beide Anforderungen in idealer Weise miteinander verbinden.

Mit dem Untersuchungsprogramm sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Einfluss der Porosität auf das Abplatzverhalten im Brandfall.
- Einfluss der Prüfkörpergeometrie und der Prüfkörpersteifigkeit auf das Abplatzverhalten im Brandfall.

Dabei sind bezüglich Porosität die beiden Parameter Luft- und Kapillarporen zu berücksichtigen. Ist die Abhängigkeit von Porenstruktur und Brandwiderstand belegt, lassen sich auch Abschätzungen des Brandwiderstandes für bestehende Bauwerksteile vornehmen. Bezogen auf neue Bauwerke bleibt zu beurteilen, in welcher Form die erforderliche Porenstruktur für den Brandschutz erzielt werden soll. Aus heutiger Sicht wird sich vermutlich eine Kombination aus Luftporen und Kunststofffasern ergeben.

Im zweiten Versuchsteil wird die Auswirkung der Prüfkörpersteifigkeit auf den Brandwiderstand untersucht. Europaweit werden heute Prüfkörper mit unterschiedlichsten Abmessungen untersucht. Bisherige Prüfergebnisse lassen vermuten, dass die Steifigkeit der Prüfkörper die Resultate der Brandprüfungen beeinflussen können. Je „weicher“ (d.h. dünner) ein Prüfkörper ist, desto schneller bilden sich Risse durch die der Wasserdampf entweichen kann. Dadurch wird das Potential für Abplatzungen reduziert, d.h. es werden zu gute Ergebnisse „produziert“. Sollte sich dieser Einfluss reproduzierbar belegen lassen, sind für jede Prüfung die Prüfkörperabmessungen zu wählen, die den Verhältnissen des zu untersuchenden Bauteiles am ehesten entsprechen.

Weiters wäre die vermutete Abhängigkeit eines Prüfergebnisses von der Prüfkörpergeometrie ein erster, wichtiger Schritt zur Vergleichbarkeit von Prüfungsergebnissen verschiedener Prüfinstitute.

3. Stand der Technik

3.1. Primär- und Sekundärliteratur

In der Literatur werden heute folgende baulichen Brandschutzmassnahmen genannt:

- Feuerfestbeton aus dem Industrieofenbau
- Mit PP-Fasern modifizierter Beton
- Thermische Barriere

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des baulichen Brandschutzes wird durch Überdimensionierung erreicht, d.h. dass im Brandfall eine ausreichende Ummantelung des tragenden Kerns besteht, so dass dieser, während einer vorher definierten Branddauer, nicht angegriffen wird. Wie jedoch oben gezeigt wurde, hängt der Brandwiderstand des extrem heterogenen Baustoffes Beton von unterschiedlichsten Faktoren, wie Restfeuchte, Porenstruktur, Mineralogie und Korngrösse der Zuschläge, Zement, Wasser, Armierung und auch dem jeweiligen Belastungsfall ab. Daher ist diese „Schutzmassnahme“ mit grossen Unsicherheiten, behaftet die nur schwer zu quantifizieren sind.

Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit wird primär durch die Zugabe von Kunststofffasern (Polypropylen) hergestellt. Diese schmelzen bei etwa 150°C, und in den entstehenden Höhlräumen kann sich der entstehende Wasserdampf entspannen und auch nach aussen entweichen. Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen [39, 51, 53, 56] zielen dabei insbesondere auf die Gewährleistung eines erhöhten Brandwiderstandes bei hohen und höchsten ($> 45 \text{ N/mm}^2$) Betonfestigkeiten.

In diversen Untersuchungen konnte mit zunehmendem Kunststoffasergehalt die Abplatzungen vermindert werden. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen werden für hochwertige Betone Dosierungen von 2 bis 4 kg/m³ als ideal angesehen. Mit zunehmendem Fasergehalt verschlechtert sich die Verarbeitbarkeit der Betonmischungen erheblich, und muss mit höheren Verflüssigerdosierungen kompensiert werden.

3.2. Untersuchungen im VersuchsStollen Hagerbach

Alp Transit Gotthard AG, Luzern, 2005

Auf Grund einer Schwachstellenanalyse des Brandschutzteams GBT wurde beschlossen Brandprüfungen mit fasermodifiziertem Beton durchzuführen. Es wurden in fünf Brandprüfungen zwei Zuschläge und fünf PP-Fasern untersucht.

Alp Transit Gotthard AG, Luzern, 2004

Bei den ATG Versuchen im 2004 blieben die hohen Druckspannungen, wie sie in den Störzonen des GBT erwartet werden, unberücksichtigt. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden in der Phase 3 die Versuchskörper in Längs- und Quer- richtung (16 bzw. 1 N/mm²) vorgespannt.

Elementwerk Brun AG, Emmen, 2003

Die Elementwerk Brun AG führte im VersuchsStollen Hagerbach eine umfangreiche Versuchsreihe an Betonelementen (Sandwichkonstruktion) durch. Die Versuche bezogen sich auf bestimmte Bauelemente der Westumfahrung Zürich (Uetlibergtunnel). Der Temperaturverlauf entsprach der RWS- bzw. der RABT Temperatur-Zeit-Kurve, wobei aber die Prüfzeit auf vier Stunden erweitert wurde.

ARGE Transco Sedrun, 2003

Die ARGE Transco Sedrun führte im Zuge der Evaluierung eines geeigneten Brandschutzsystems für den Schacht II in Sedrun umfangreiche Brandprüfungen im VersuchsStollen Hagerbach durch. Der Temperaturverlauf war vom Auftraggeber vorgegeben. Die Anforderungen lagen unter den Anforderungen der RABT Temperatur-Zeit-Kurve.

Fortatech AG, St. Gallen, 1999 – 2002

Die Fortatech AG führte in Zusammenarbeit mit der Memarco AG zahlreiche Brandprüfungen zur Grundlagenforschung durch, um Kenntnisse über die Einflussfaktoren und die Wirkungsweise von PP-Fasern zu erhalten. Zur Anwendung kam ein Temperaturverlauf wie er der RWS-Kurve entspricht.

3.3. Zusammenfassung

In der Literatur finden sich in diesem Zusammenhang keine speziellen Hinweise auf die im heutigen Tunnelbau üblicherweise verwendeten Betonqualitäten C25/30.

An dieser Stelle besteht eine Wissenslücke, die durch die vorgeschlagenen Untersuchungen verringert oder im Idealfall geschlossen wird.

4. Untersuchungsprogramm

4.1. Einleitung

In diesem Kapitel wird das Untersuchungsprogramm dargestellt. Dazu gehört einleitend die Vorstellung der Versuchsparameter, daran anschliessend der Versuchsaufbau und die Vorgehensweise sowie abschliessend die gewählte Versuchsdokumentation.

4.2. Versuchsparameter

4.2.1. Einleitung

Im Folgenden werden mögliche Einflussparameter auf die Brandbeständigkeit von Beton beschrieben, die für das Untersuchungsprogramm relevant sind.

4.2.2. Ofentemperatur

Verschiedenste europäische Prüfnormen/-richtlinien verwenden ganz unterschiedliche Temperatur-Zeit-Kurven für Brandprüfungen mit Beton. Dabei wird sehr häufig von einem „schlimmsten möglichen Unfall“ ausgegangen. Diese Katastrophen treten mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auf, und sind vermutlich nur mit feuerfesten Produkten zu beherrschen und bleiben daher für diese Versuchsreihe unberücksichtigt.

In der Anfangsphase eines Brandes wird das Abplatzen von Beton durch den entstehenden Wasserdampf hervorgerufen, der nicht frei entweichen kann. Dieser Prozess setzt unmittelbar mit dem Brandbeginn ein, und dauert erfahrungsgemäss zwischen 25 und 40 Minuten.

Als Temperatur-Zeit-Kurve für die angestrebten Versuche wird deshalb der Verlauf gemäss der deutschen ZTV, mit einer Maximaltemperatur von 1'200 °C und einer Prüfdauer von 30 Minuten gewählt, wobei die Abkühlphase gemäss ZTV nicht berücksichtigt wird. Der Temperaturverlauf ZTV liegt zwischen dem Maximum einer RWS-Kurve und dem Minimum der ISO-Brandkurve (Abbildung 1).

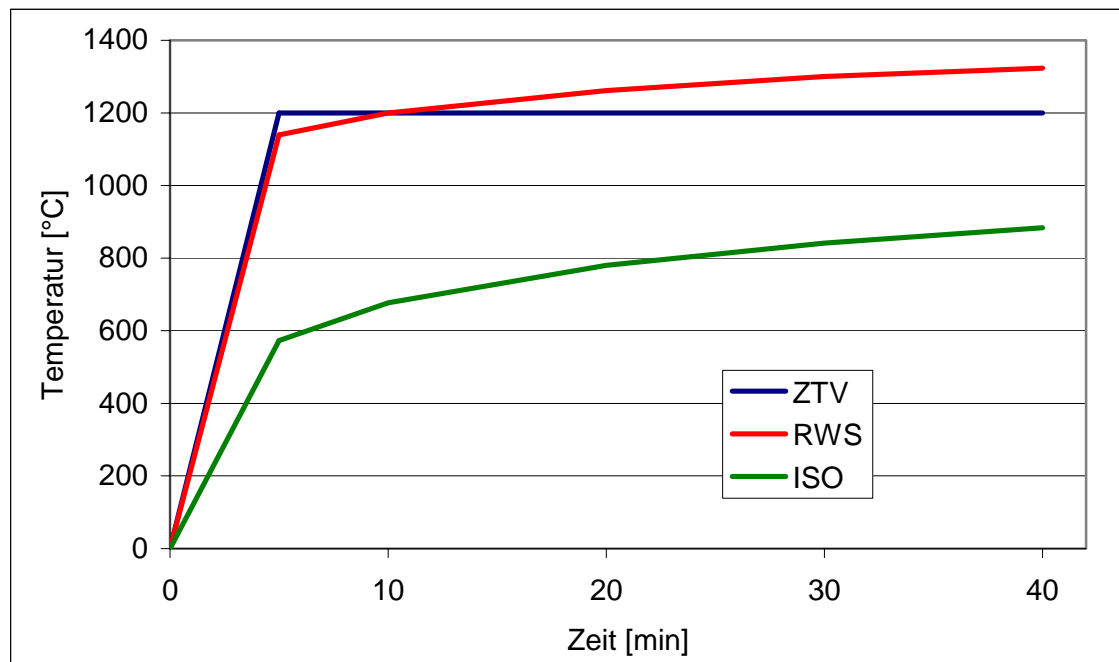


Abbildung 1: ZTV Temperatur-Zeit-Kurve für die Ofensteuerung im Vergleich mit RWS- und ISO-Kurve

4.2.3. Porosität

Die Porosität ist von Hydratationsporen einerseits und Luftporen andererseits zu unterscheiden, wobei das Verhältnis der beiden Porenarten in hohem Mass vom w/z-Wert abhängig ist.

Bei Beton in hohem Alter (mehrere Jahre) wird die Struktur des Porensystems auch durch Karbonatisierungsprozesse beeinflusst. Dieser Parameter wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht betrachtet. Sollte sich im Laufe der Untersuchungen eine Abhängigkeit der Ergebnisse von den Karbonatisierungsporen abzeichnen, ist allenfalls das Phänomen detaillierter zu untersuchen.

4.2.4. Prüfkörperfeuchte

Die Bauteilfeuchte stellt sich in Abhängigkeit von den gegebenen klimatischen Randbedingungen ein, und kann bei einem gegebenen Bauwerk ohne zusätzliche Massnahmen praktisch nicht beeinflusst werden.

Der Einfluss dieses Parameters wird nicht näher untersucht. Die Prüfungen werden bei einer Bauteilfeuchte von 3-5 % ausgeführt.

4.2.5. Zuschlagstoffe

Da die Zuschläge den grössten Anteil am heterogenen Baustoff Beton darstellen, beeinflussen sie das Brandverhalten entscheidend. Der Einfluss der Mineralogie der Zuschlagstoffe wird nicht weiter betrachtet. Durch die Zugabe von Zuschlagstoff aus einem Kieswerk wird dieser Parameter konstant gehalten.

4.2.6. Prüfkörpersteifigkeit

Die Erfahrung zeigt, dass sich plattenförmige Prüfkörper unter Temperaturbelastung aufbiegen, was zu Rissen führt über die, der Wasserdampf entweichen kann. Dadurch wirkt sich die Steifigkeit des Prüfkörpers auf das Prüfergebnis aus. Je grösser die Steifigkeit des Prüfkörpers ist, umso grösser werden die sich aufbauenden Drücke und die damit verbundene Schädigungsgefahr des Prüfkörpers.

Diesbezügliche systematische Untersuchungen sind bis heute nicht bekannt, so dass Anforderungen der Prüfkörperabmessungen aus den bisherigen Versuchen nicht abgeleitet werden können. Neben der Steifigkeit spielt auch die Dehnungsbehinderung eines Prüfkörpers eine wichtige Rolle, so dass wir diesen Umstand bei der Prüfkörperherstellung durch einen Stahlrahmen (siehe 4.3.2) ebenfalls berücksichtigen.

4.3. Versuchsaufbau

4.3.1. Versuchsofen

Der im Versuchstollen Hagerbach AG für Brandprüfungen verwendete Prüfofen (Abbildung 2) besteht aus einem zweischaligen Wandaufbau mit feuerfester Innenverkleidung. Die Brandkammer weist die Abmessungen $l=1100$ mm, $b=1100$ mm, $h=1100$ mm auf. Die Beflammung erfolgt mit einem Ölbrenner ELCO EL 4.150 P, der mit handelsüblichem Heizöl EL betrieben wird.

Mit dem Brandofen werden Temperaturen erreicht, die alle im technischen Brandschutz gebräuchlichen Anforderungen von Temperatur-Zeit-Kurven abdecken, einschliesslich der hohen Anforderungen der RWS-Kurve, mit $1'200$ °C nach 10 min und $1'350$ °C nach 60 Minuten.

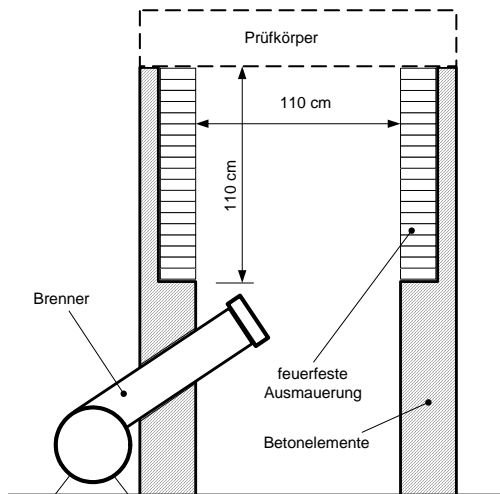


Abbildung 2: Derzeitiger Prüfofen im Versuchstollen Hagerbach.

4.3.2. Versuchsplanung

4.3.2.1. Allgemein

Für die Versuchsserie 1 wird eine Prüfkörperdicke von 150 mm und für die Versuchsserie 2 von 350 mm gewählt. Um den Einfluss einer Dehnungsbehinderung darzustellen wird für die 2. Versuchsserie ein Stahlrahmen verwendet, der mit der Armierung stoffschlüssig verbunden ist.

Die Temperatursensoren werden bei der Plattenherstellung mit einbetoniert, damit eine optimale thermische Koppelung der Sensoren sichergestellt wird. Die Beton-temperaturen werden mit Thermoelementüberdeckungen von 50, 70 und 90 mm erfasst. Dadurch ergibt sich erfahrungsgemäss ein aussagekräftiges Temperaturprofil.

Um Unterschiede bei der Betonherstellung auszuschliessen, werden alle Prüfkörper der ersten und der zweiten Serie aus jeweils derselben Mischung hergestellt.

4.3.2.2. Versuchsserie 1 Einfluss der Porosität in Abhängigkeit des w/z Werts

Für die Versuchsserie 1 werden 4 Prüfkörper (Tabelle 1) hergestellt. Die Versuchskörper 1 werden in einer Holzschalung betoniert und mit einem Baustahlgitter ($a=150$ mm, $t=6$ mm) armiert.

Die Armierung hat ein vollständiges Versagen und Einbrechen des Prüfkörpers in den Brandofen verhindert.

Um die Versuchsergebnisse verifizieren zu können, werden von jeder Kombination 2 Prüfkörper hergestellt, je ein Prüfkörper zur Prüfung und ein Prüfkörper in Reserve.

Ob eine Wiederholung bzw. mehr als ein Versuch je Kombination notwendig ist, zeigt sich im Laufe der Untersuchungen anhand der Ergebnisse. Bei klaren Aussagen der Versuche wird aus Kostengründen auf weitere Versuche verzichtet.

		Luftporengehalt [%]	
		0.5 - 1.5	6 - 8
w/z	0.42	1	1
	0.52	1	1

Tabelle 1: Anzahl der Prüfkörper für die Versuchsserie 1 (Probenkörperdicke d= 150 mm)

4.3.2.3. Versuchsserie 2 Einfluss der Prüfkörpergeometrie und –steifigkeit in Abhängigkeit des w/z-Wertes

Für die Versuchsserie 2 werden ebenfalls 4 Prüfkörper gemäss Tabelle 2 hergestellt. Die Versuchskörper 2 werden in einer Stahlschalung betoniert, wobei die jeweils gegenüberliegenden Schalungsbleche auf halber Höhe mit Armierungseisen (20 mm) verschweisst sind. Im Gegensatz zu den Prüfkörpern der Serie 1 sind die Prüfkörper der zweiten Serie durch die Dicke von 350 mm wesentlich steifer, und durch die verschweisste Stahlschalung dehnungsbehindert.

Auch bei dieser Serie wird analog zur ersten Versuchsreihe zusätzlich jeweils eine weitere Platte hergestellt, um gegebenenfalls einen Versuch wiederholen zu können.

		Luftporengehalt [%]	
		0.5 - 1.5	6 - 8
w/z	0.42	1	1
	0.52	1	1

Tabelle 2: Anzahl der Prüfkörper für die Versuchsserie 2 (Probenkörperdicke d= 350 mm)

4.4. Auswertungsmethodik

Bei allen Versuchen werden folgende Parameter erfasst:

- Ofentemperatur
- Temperaturen in den Prüfkörpern mit den Überdeckungen 50, 70 und 90 mm
- Bestimmung der Fläche mit Abplatzungen
- Bestimmung des abgeplatzten Volumens
- Maximale Abplatztiefe
- Festbetoneigenschaften (Porosität, Druckfestigkeit)
- Frischbetoneigenschaften
- Betonfeuchte vor der Brandprüfung
- Fotodokumentation

Nach jeder Brandprüfung wird beurteilt, ob die Durchführung der weiteren Versuche mit den gleichen Parameterkombinationen sinnvoll ist, d.h. ob noch zusätzliche Erkenntnisse zu erwarten sind. Wenn nicht, wird das Versuchsprogramm angepasst (Abbildung 3).

Ausgehend von der Einzeldarstellung der Versuchsergebnisse erfolgt eine vergleichende Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse, um die Einflüsse der Parameter

- Porenstruktur und
- Prüfkörpersteifigkeit

nachvollziehbar aufzuzeigen.

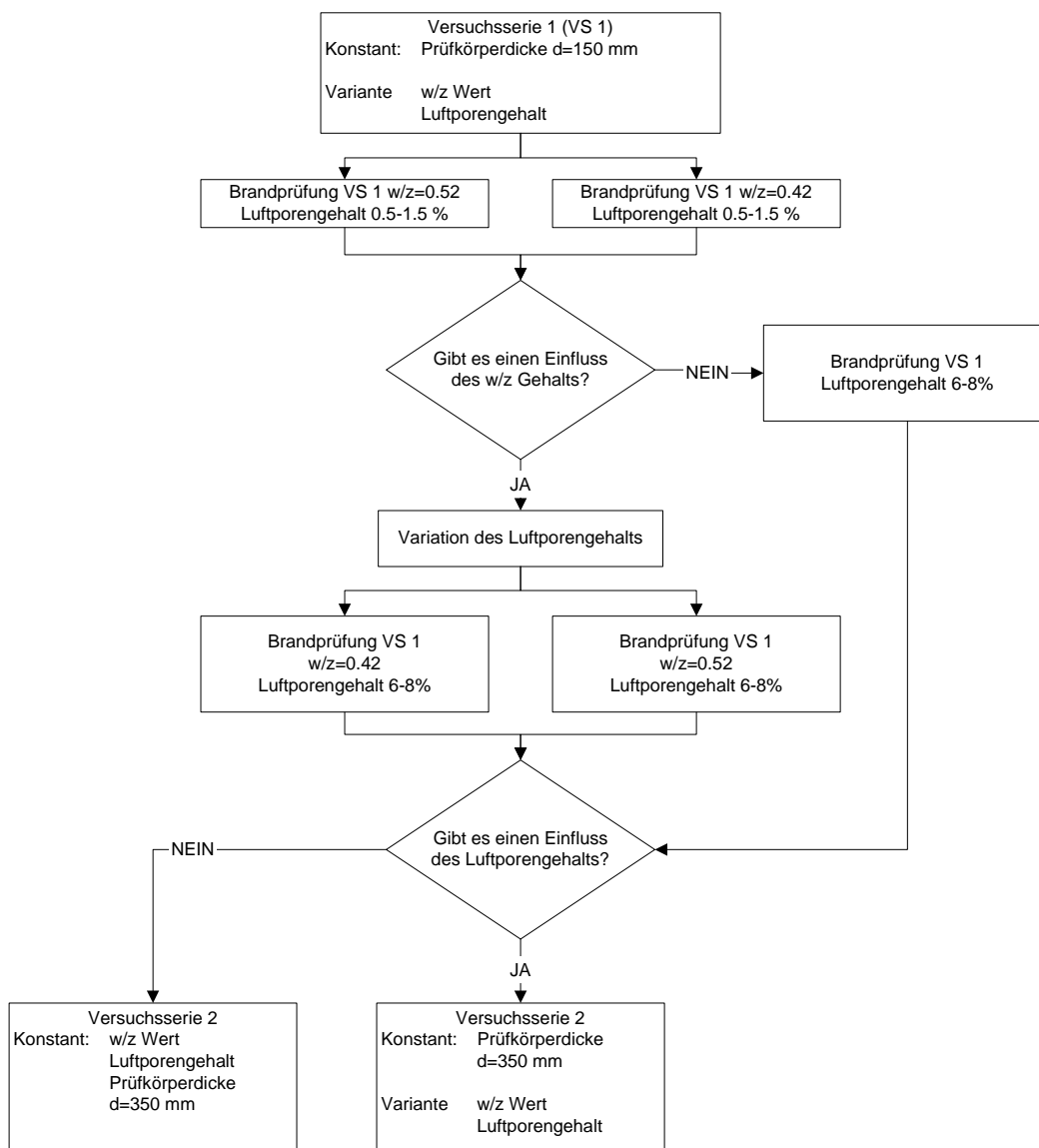


Abbildung 3: Auswertemethodik

4.5. Zusammenfassung Untersuchungsprogramm

Mit dem hier dargestellten Versuchsprogramm werden die Einflussfaktoren Porenstruktur und Prüfkörpersteifigkeit systematisch auf ihren Einfluss auf die Brandbeständigkeit von konventionellem Beton untersucht.

Die Untersuchung ist dabei dynamisch ausgelegt. Nur wenn neuere Erkenntnisse zu erwarten sind, werden alle Prüfkörper geprüft. Für die Bewertung der Ergebnisse liegen langjährige Erfahrungen der VersuchsStollen Hagerbach AG vor.

Aus versuchssystematischen Gründen werden alle Prüfkörper in Serie hergestellt.

5. Versuchsdurchführung

5.1. Herstellen der Prüfkörper

5.1.1. Betongüte

Alle Versuchskörper wurden nach gleichem Grundrezept produziert. Einzig die Zugabe von Luftporenbildern variierte. Von jeder Mischung wurden vier Prüfkörper (2 x d=150 mm und 2 x d=350 mm) hergestellt. Die erreichten w/z-Werte und Luftporengehalte gibt Tabelle 3 wieder.

Herstell- datum	Festigkeits- klasse	Zement- gehalt [kg/m ³]	w/z	LP [%]	PP-Faser- gehalt [kg/m ³]	d [mm]
07.06.2005	C 25/ 30	325	0.52	1.4	1.0	150 und 350
20.06.2005	C 25/ 30	325	0.42	1.5	1.0	150 und 350
28.06.2005	C 25/ 30	325	0.42	7.7	1.0	150 und 350
30.06.2005	C 25/ 30	325	0.52	7.7	1.0	150 und 350

Tabelle 3: Erzielter Luftporengehalt und w/z-Wert der Betonmischungen



Abbildung 4: Herstellen der Prüfkörper

5.1.2. Prüfkörperaufbau

Zur Erfassung der Temperaturen im Beton wurden in jedem Versuchskörper 3 redundante Thermoelemente (je 2 mit 50, 70 und 90 mm Überdeckung) vom Typ K installiert (Abbildung 5).

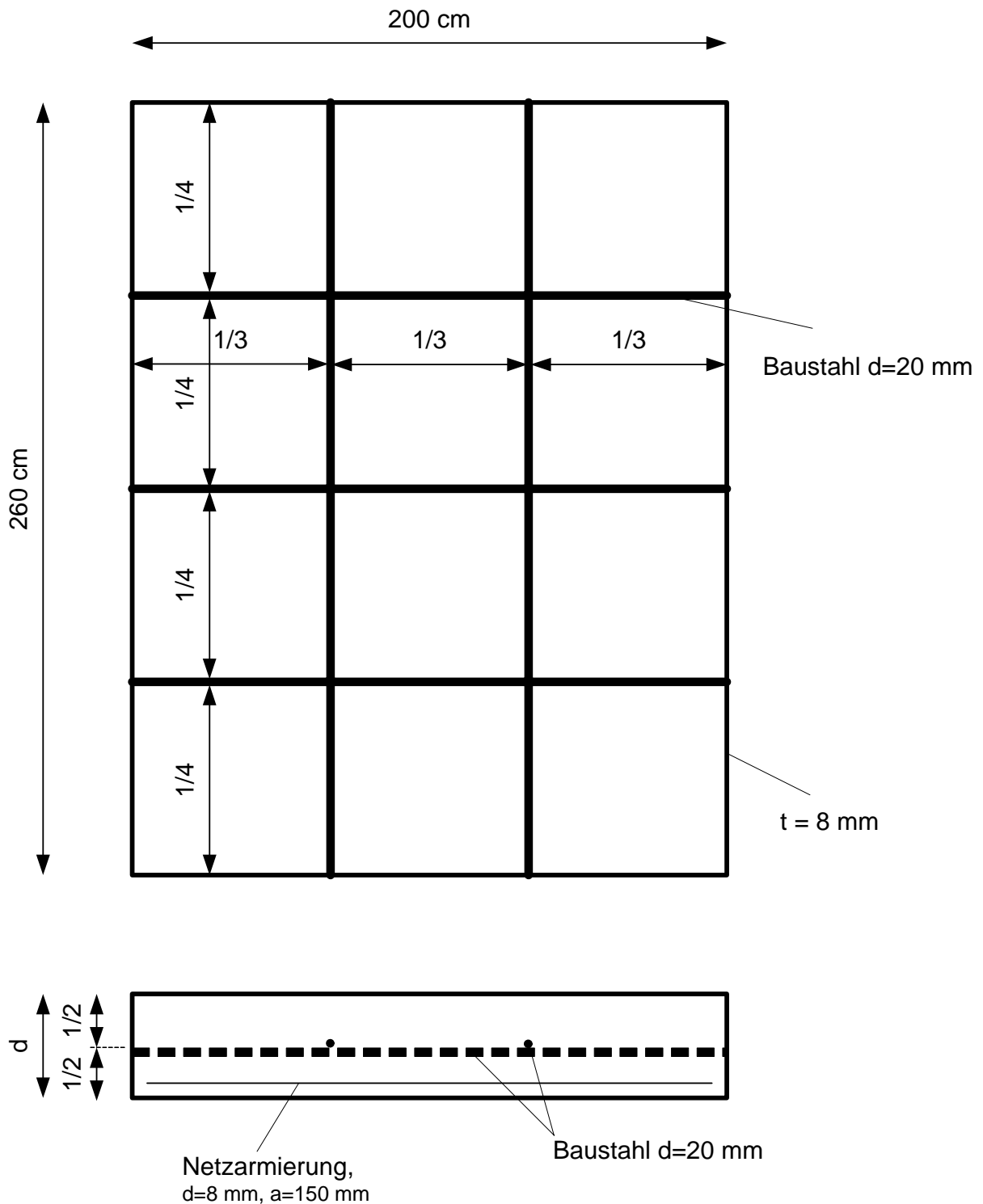


Abbildung 5: Skizze der Prüfkörperschalung

Gemäss dem Versuchsprogramm wurden die 150 mm Platten in einer Holzschalung, die 350 mm Platten in einer Stahlschalung betoniert. Beide Platten wurden auf der Oberflächenseite mit einer Holzschalung betoniert. Damit ist eine vergleichbare Oberflächengüte für die dem Brenner zugewandte Seite gewährleistet.

Die Prüfkörper mit 350 mm Dicke erhielten einen Stahlrahmen zur Dehnungsbehinderung (Abbildung 6 und Abbildung 7). Die Stahlplatten hatten eine Dicke $t=8$ mm.

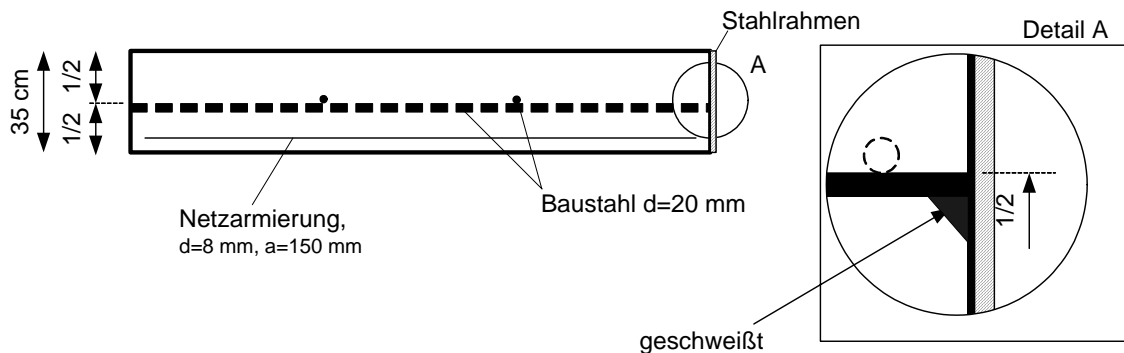


Abbildung 6: Detail Dehnungsbehinderung Prüfkörper der Versuchsserie 2

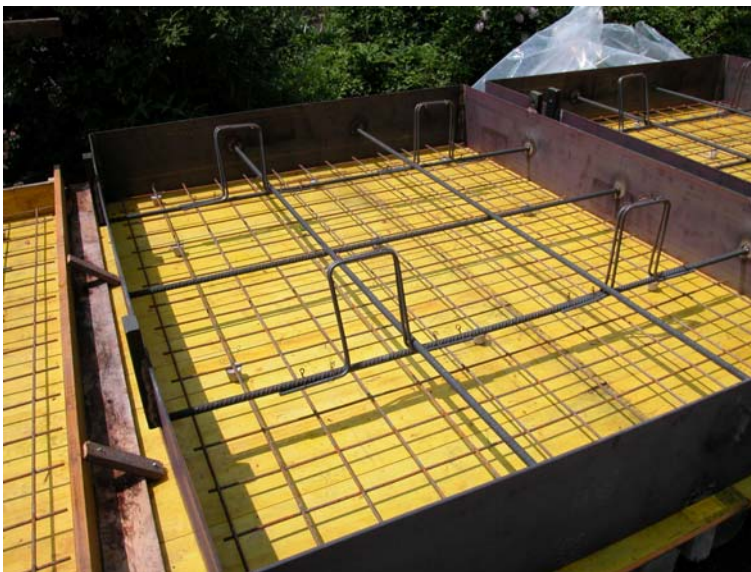


Abbildung 7: Stahlrahmen zur Dehnungsbehinderung und zugleich als Schalung

5.2. Brandprüfungen

5.2.1. Versuchsnomenklatur

Als Nomenklatur der Prüfkörper wird die Herstellungsreihenfolge durchnummeriert.

Prüfkörperbezeichnung	Herstelldatum
Mix 1	07.06.2005
Mix 2	20.06.2005
Mix 3	28.06.2005
Mix 4	30.06.2005

Tabelle 4: Prüfkörpernomenklatur

5.2.2. Versuchsserie 1 Einfluss der Porosität in Abhängigkeit des w/z-Wertes

5.2.2.1. Einleitung

In dieser Versuchsserie steht die Untersuchung des Porositätseinflusses im Vordergrund. Daher werden in dieser Versuchsreihe Prüfkörper mit einer Dicke von 150 mm geprüft.

5.2.2.2. Prüfkörper Mix 1, Prüfkörperdicke $d=150$ mm

- Ca. 2 Minuten nach dem Versuchsstart traten erste Abplatzungserscheinungen (popcorn spalling) auf.
- Ende der Abplatzungen nach ca. 13 min
- Max. Abplatztiefe: 1.7 cm
- Abgeplatztes Volumen: $5'800 \text{ cm}^3$

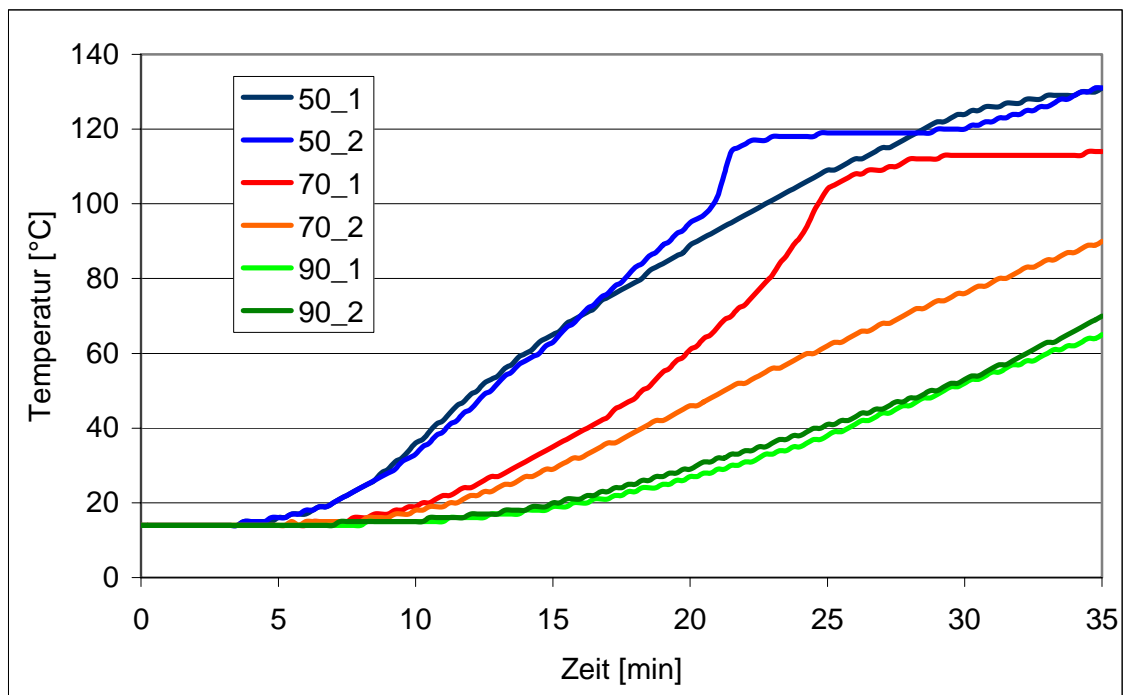


Abbildung 8: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 1 mit $d=150$ mm



Abbildung 9: Prüfkörper Mix 1 mit d=150 mm nach der Brandprüfung

Prüfkörper Mix 2, Prüfkörperdicke d=150 mm

- Ca. 90 Sekunden nach dem Versuchsstart traten erste Abplatzungserscheinungen (popcorn spalling) auf
- Ab ca. 18 Minuten nach dem Versuchsstart wurden keine Abplatzungen mehr festgestellt
- Max. Abplatztiefe: 6.8 cm
- Abgeplatzt Volumen: 30'500 cm³

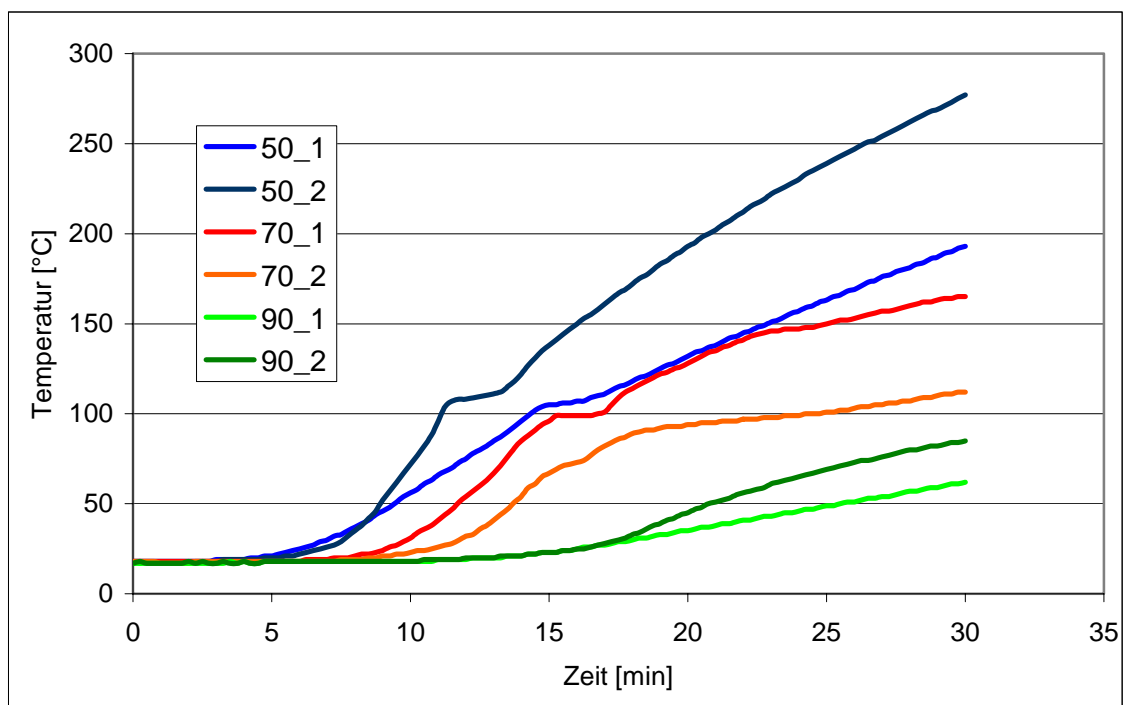


Abbildung 10: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 2 mit d=150 mm

Die Differenz zwischen den Kurven 50_1 und 50_2 sowie 70_1 und 70_2 ist mit den inhomogenen Abplatzungen zu erklären. Damit ist über den Thermoelementen eine unterschiedliche Überdeckung vorhanden und somit herrschen andere Temperaturen an den Thermoelementspitzen vor.



Abbildung 11: Prüfkörper Mix 2 mit d=150 mm nach der Brandprüfung

5.2.2.4. Prüfkörper Mix 3, Prüfkörperdicke d=150 mm

- Max. Abplatztiefe: << 1 cm
- Abgeplatztes Volumen: vernachlässigbar

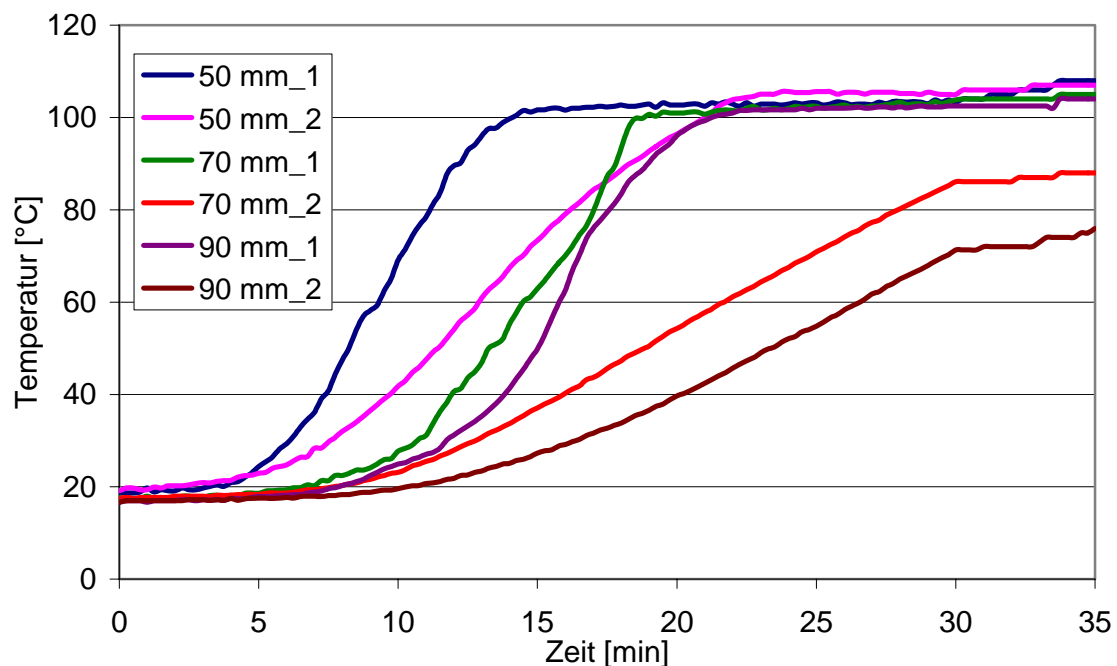


Abbildung 12: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 3 mit d=150 mm



Abbildung 13: Prfkkrper Mix 3 mit d=150 mm nach der Brandprfung

Die in Abbildung 13 erkennbaren Abplatzungen sind im Wesentlichen whrend der Abkhlphase nach der Brandprfung entstanden (Cold spalling). Somit haben diese keinen Einfluss auf das Ergebnis.

5.2.2.5. Prfkkrper Mix 4, Prfkkrperdicke d=150 mm

- Max. Abplatztiefe: << 1 cm
- Abgeplatzt Volumen: vernachlssigbar

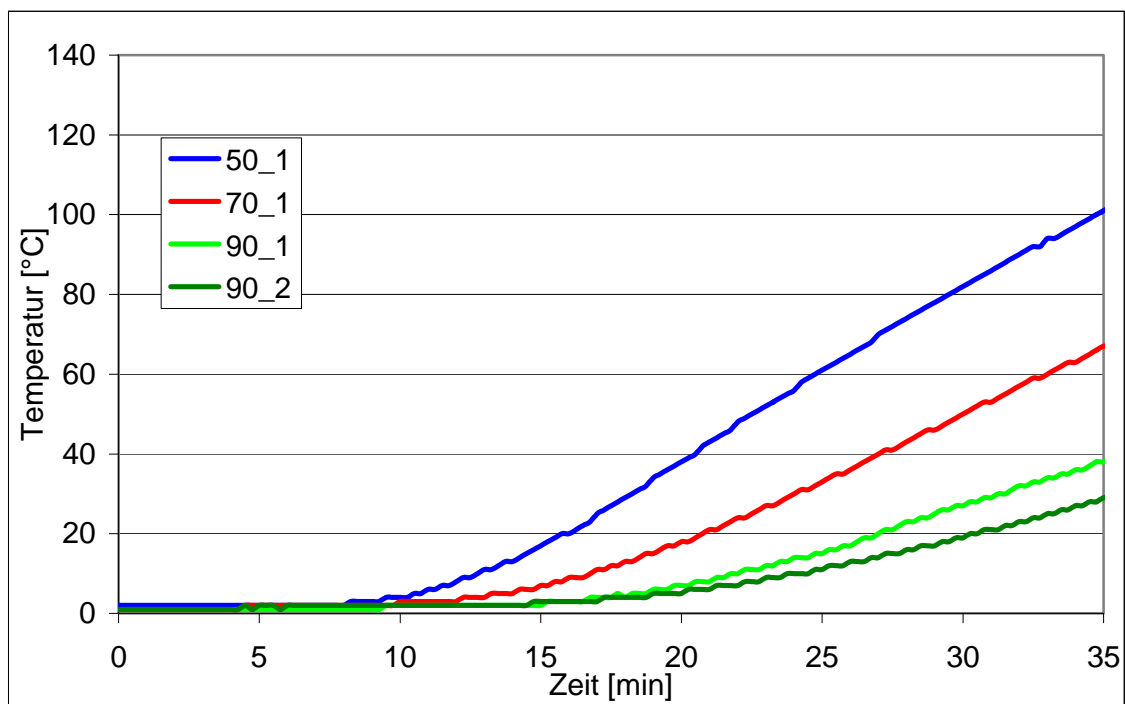


Abbildung 14: Temperaturverlauf im Beton beim Prfkkrper Mix 4 mit d=150 mm

Die Thermolemente 50_2 und 70_2 sind während des Versuchs ausgefallen. Die redundanten Thermolemente 50_1 und 70_1 haben deren Aufgabe übernommen.

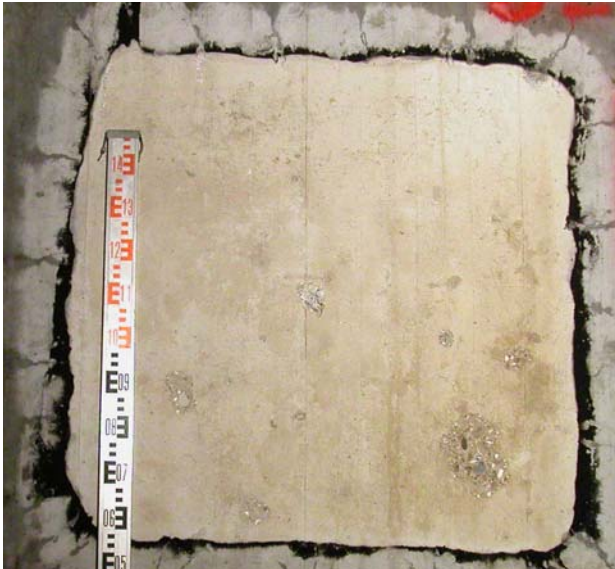


Abbildung 15: Prüfkörper Mix 4 mit $d=150$ mm nach der Brandprüfung

5.2.2.6. Fazit und Folgerungen für die weitere Vorgehensweise

In den ersten Brandprüfungen zeigt sich eine Abhängigkeit des Brandwiderstands vom w/z-Wert und vom Luftporengehalt (Abbildung 16).

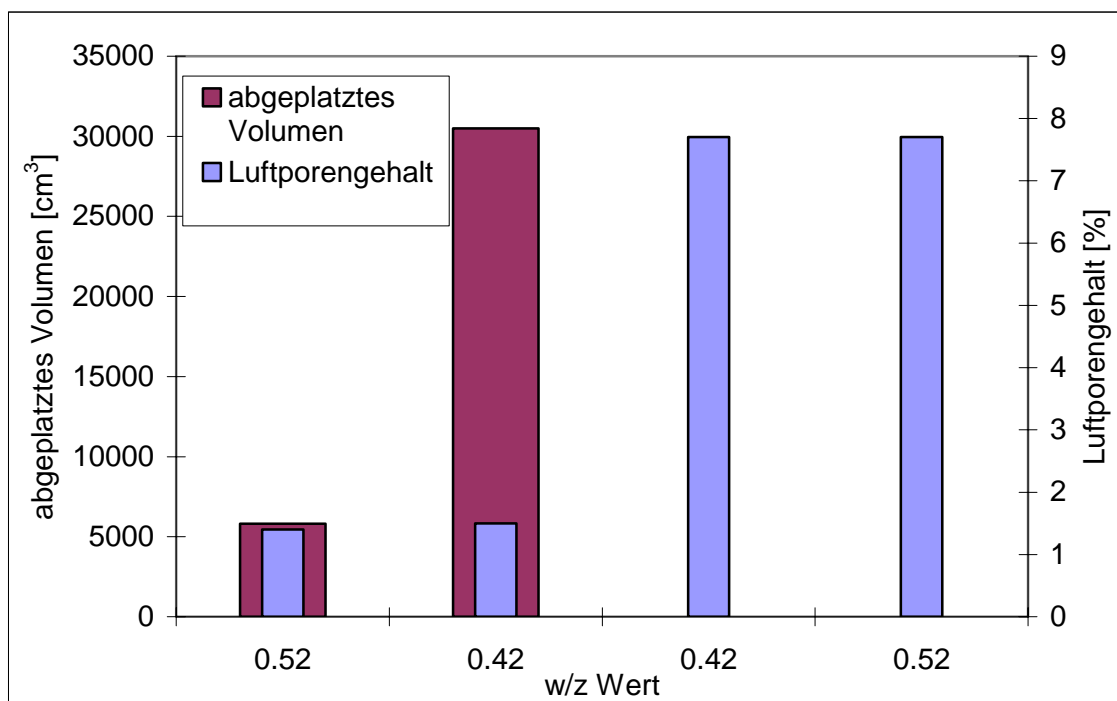


Abbildung 16: Abhängigkeit des Brandwiderstands vom w/z Wert und Luftporengehalt

Somit wird gemäss Auswertemethodik die folgende Versuchsserie mit variiertem w/z-Wert und Luftporengehalt bei konstanter Prüfkörperdicke und Dehnungsbehinderung durchgeführt.

5.2.3. Versuchsserie 2 Einfluss der Prüfkörpergeometrie und -steifigkeit auf den Brandwiderstand in Abhängigkeit des w/z-Wertes

5.2.3.1. Einleitung

Nach dem in Versuchsserie eine Abhängigkeit des Brandwiderstands vom w/z-Wert und vom Luftporengehalt aufgezeigt werden konnte, werden diese Varianten analog zur Versuchsserie 1 verändert bei gleichzeitiger Erhöhung der Prüfkörpersteifigkeit und behinderter Prüfkörperdehnung.

5.2.3.2. Prüfkörper Mix 1, Prüfkörperdicke $d=350$ mm

- Ca. 2 Minuten nach dem Versuchsstart traten erste Abplatzungserscheinungen (popcorn spalling) auf.
- Zwischendurch kam es immer wieder zu einzelnen, dumpfen Knallen (ca. 3 Min. und ca. 5 Min. nach Versuchsstart).
- Max. Abplatztiefe: 4.2 cm
- Abgeplatztes Volumen: 15'000 cm³

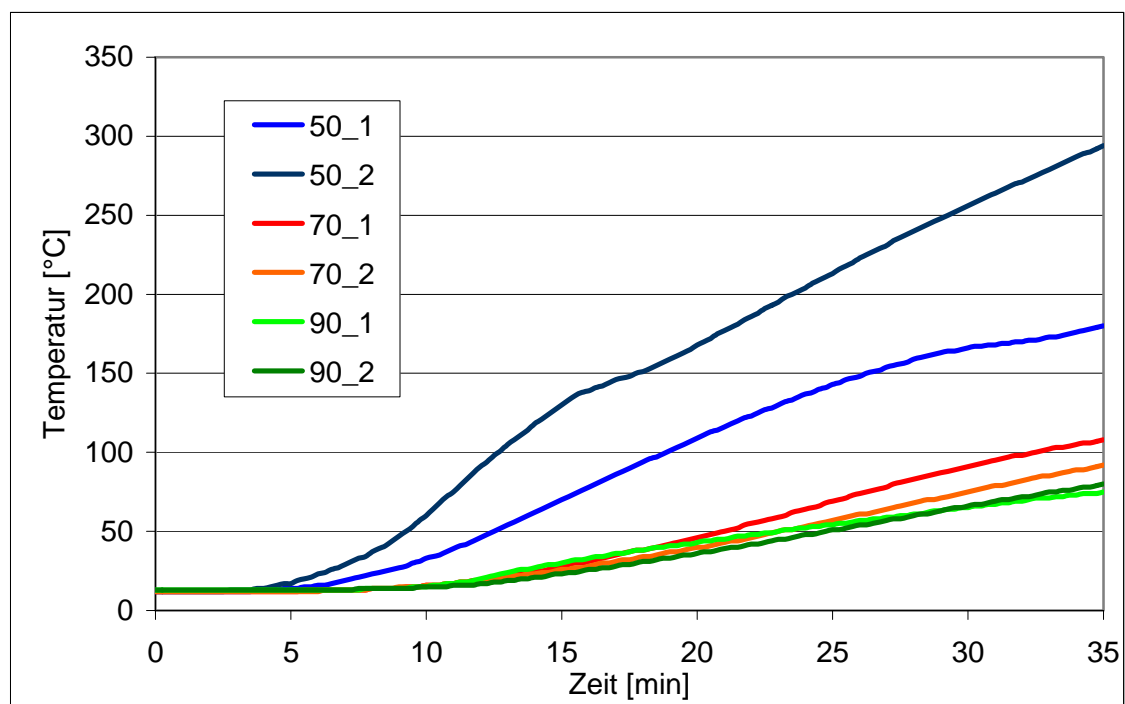


Abbildung 17: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 1 mit $d=350$ mm



Abbildung 18: Prüfkörper Mix 1 mit d=350 mm nach der Brandprüfung

5.2.3.3. Prüfkörper Mix 2, Prüfkörperdicke d=350 mm

- Ca. 2 Minuten nach dem Versuchsstart traten erste Abplatzungserscheinungen (popcorn spalling) auf.
- Zwischendurch kam es immer wieder zu einzelnen, dumpfen Knallen (ca. 3 Min. und ca. 4 Min. nach Prüfungsbeginn).
- Nach ca. 9 Minuten waren min. 50 mm bereits abgeplatzt.
- Max. Abplatztiefe: 20.6 cm
- Abgeplatzt Volumen: 102'000 cm³

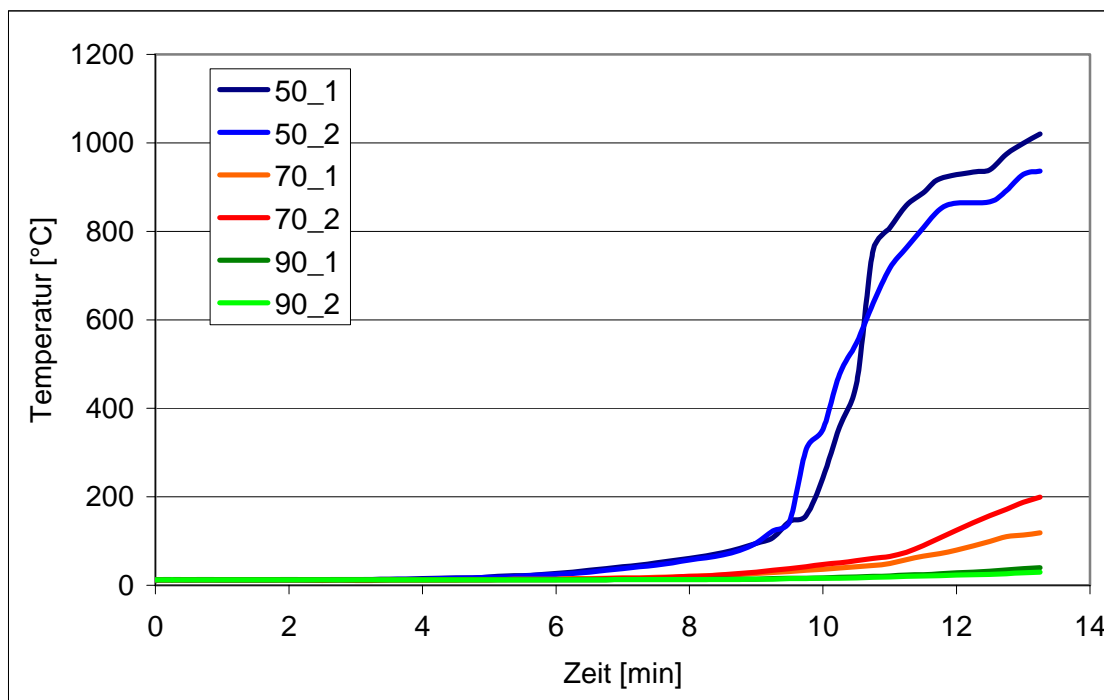


Abbildung 19: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 2 mit d=350 mm

Aufgrund der grossen Abplatzraten wurde aus Schutz des Ofens nach ca. 13 Min. der Versuch beendet. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse genügen zur aussagekräftigen Interpretation.

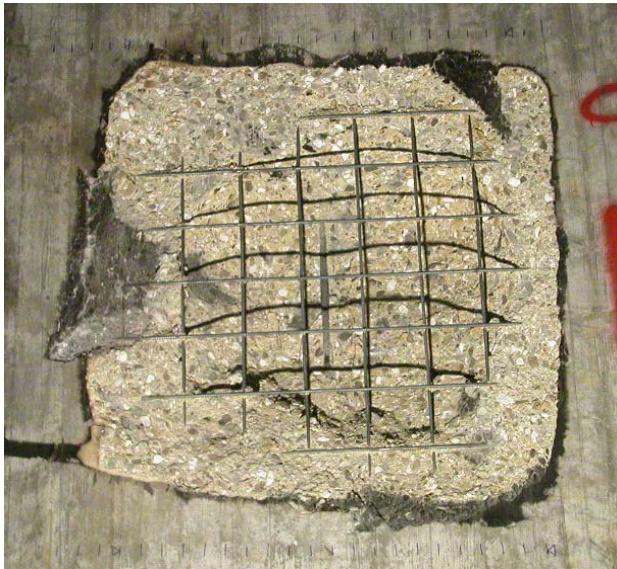


Abbildung 20: Prüfkörper Mix 2 mit $d=350$ mm nach der Brandprüfung

5.2.3.4. Prüfkörper Mix 3, Prüfkörperdicke $d=350$ mm

- Max. Abplatztiefe: $\ll 1$ cm
- Abgeplatztes Volumen: vernachlässigbar

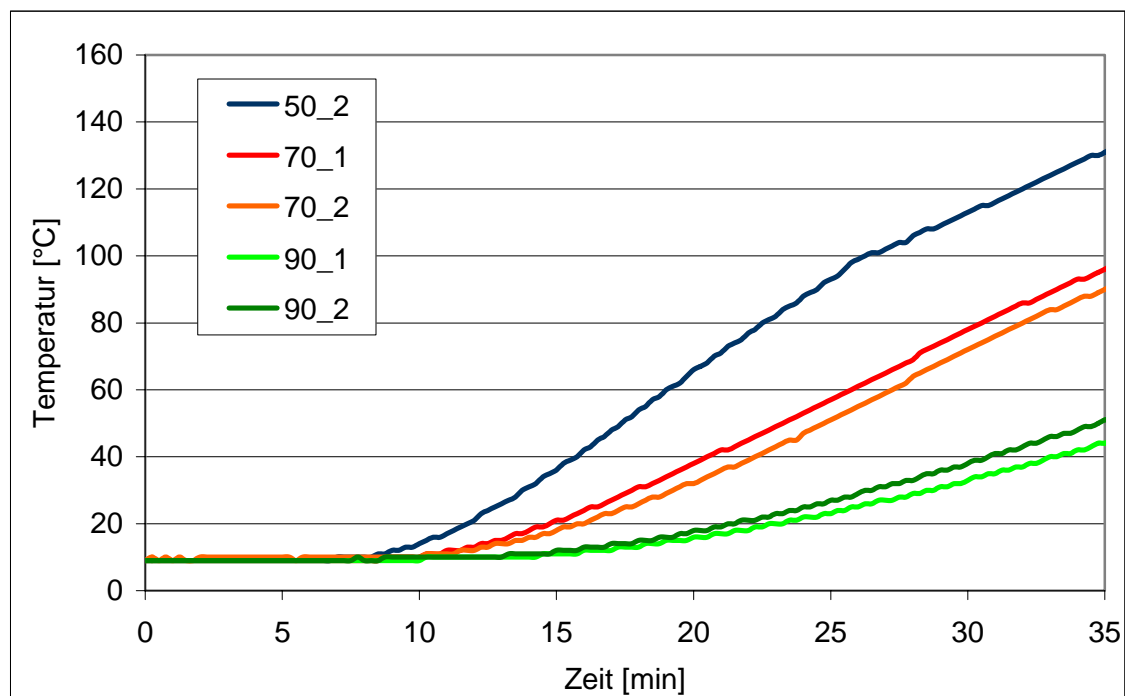


Abbildung 21: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 3 mit $d=350$ mm

Die Kurve des Thermoelements 50_1 fehlt, da das Messinstrument ausfiel.



Abbildung 22: Prüfkörper Mix 3 mit d=350 mm nach der Brandprüfung

Die in Abbildung 22 erkennbaren Abplatzungen sind nach Prüfungsende aufgetreten.

5.2.3.5. Prüfkörper Mix 4, Prüfkörperdicke d=350 mm

- Abgeplatzt Volumen: vernachlässigbar

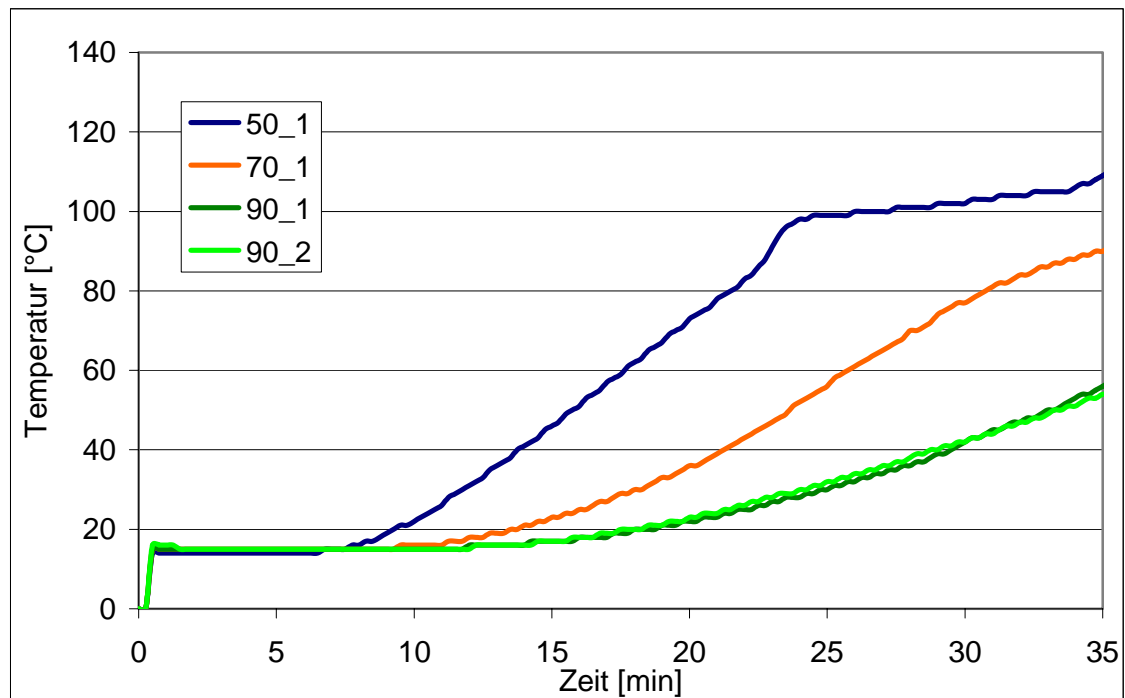


Abbildung 23: Temperaturverlauf im Beton beim Prüfkörper Mix 4 mit d=350 mm

Wegen Ausfalls des Thermoelements 50_2 und 70_2 sind deren Kurven nicht abgebildet.



Abbildung 24: Prüfkörper Mix 4 mit $d=350$ mm nach der Brandprüfung

5.2.4. Fazit der Brandprüfungen

In der ersten Versuchsserie 1 konnte eine Abhängigkeit des Brandwiderstands vom w/z-Wert und vom Luftporengehalt aufgezeigt werden.

In der Versuchsserie 2 konnten die Ergebnisse der ersten Versuchsserie bestätigt werden. Zugleich zeigte sich durch die Dehnungsbehinderung des Stahlrahmens und der höheren Steifigkeit der dickeren Prüfplatte ein verminderter Brandwiderstand (Abbildung 25).

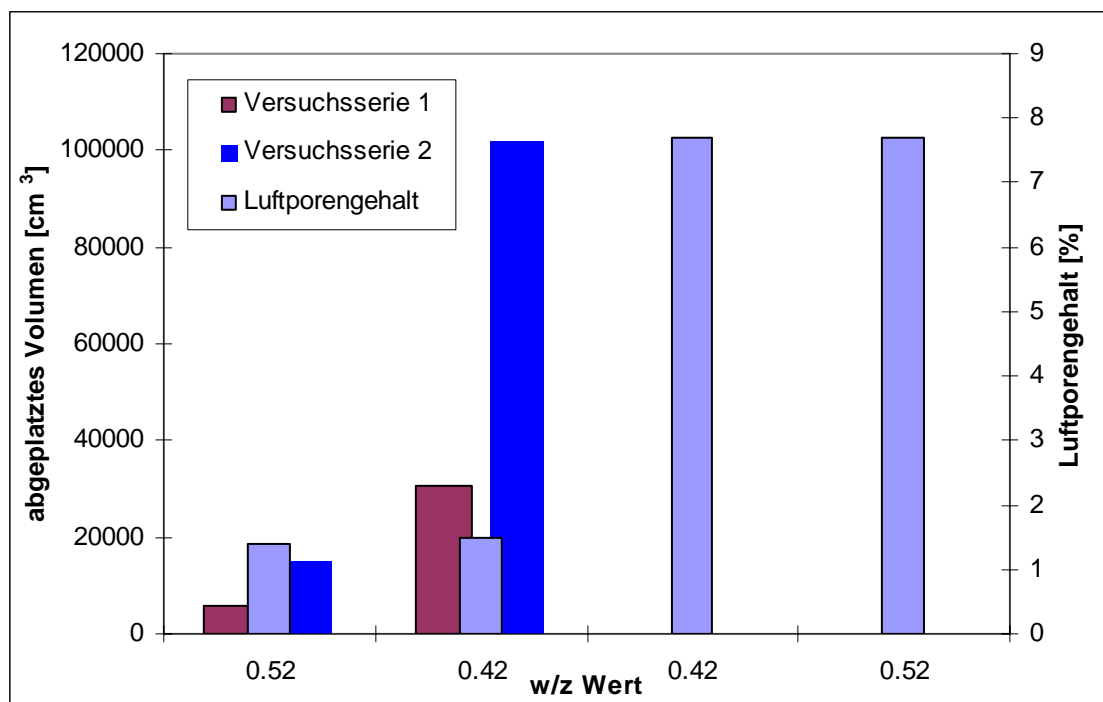


Abbildung 25: Vergleich der Erkenntnisse der Versuchsserien 1 und 2

5.3. Bestimmung der Betoncharakteristika

5.3.1. Feuchtigkeitsbestimmung

5.3.1.1. *Abhängigkeit der Feuchtigkeit von der Bestimmungsmethode*

Vor der Bestimmung der Feuchte der einzelnen Prüfkörper wurde eine Versuchsreihe über verschiedene Prüfkörpergewinnungsmethoden durchgeführt, um drei unterschiedliche Entnahmetechniken miteinander zu vergleichen.

Die Gewinnungsmethoden waren:

- Herausspitzen der Probe mit einem elektrischen Bohrhammer bis in eine Tiefe von ca. 70 mm.
- Gewinnung eines 70 mm langen Bohrkerns (nass gebohrt)
- Gewinnung eines 70 mm langen Bohrkerns (trocken gebohrt)

In der Praxis führt das Herausspitzen von Probenmaterial nicht immer zu befriedigenden Ergebnissen, weil die Probennahme nur bis zu einem gewissen Punkt standardisiert werden kann (wer nimmt die Probe? bis in welche Tiefe?...). Durch die Entnahme von Bohrkernen werden diese Unbekannten grösstenteils eliminiert. Dagegen steht die Frage im Raum, inwieweit Trocken bzw. Nassbohren den Feuchtegehalt beeinflusst.

Sowohl beim gespitzten Material als auch bei den Bohrkernen wurden die obersten 2 cm entfernt damit etwaige Randeffekte das Ergebnis nicht beeinflussen. Die Resultate sind in Abbildung 26 dargestellt. Demnach ist kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Methoden zu erkennen. Aus diesem Grund wurden für die Bestimmung aller weiteren Feuchtigkeitswerte nasse Bohrkern entnommen.

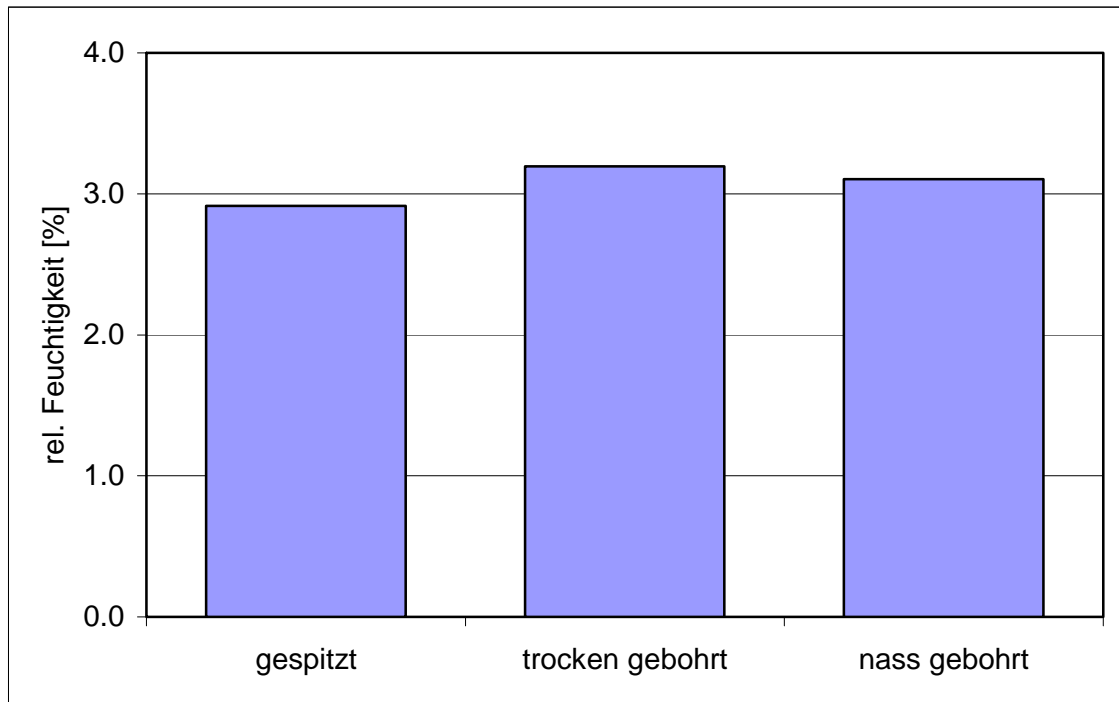


Abbildung 26: rel. Feuchtigkeiten in Abhängigkeit der Gewinnungsmethode

Entgegen der Erwartung ist die Feuchtigkeit des trocken gebohrten Bohrkerns im Rahmen der Messgenauigkeit identisch mit der des nass gebohrten Kerns.



Abbildung 27: Probengewinnung durch Herausspitzen (li) und durch Bohrkernentnahme (re)

5.3.1.2. Relative Feuchtigkeiten der Prüfkörper

Mit der im vorherigen Kapitel festgelegten Gewinnungsverfahren wird die Restfeuchte der Prüfkörper bestimmt.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse wiedergegeben.

Mix	d [mm]	rel. Feuchtigkeit [%]
1	150	3.8
	350	
2	150	3.1
	350	
3	150	3.9
	350	
4	150	5.0
	350	

Tabelle 5: Relative Feuchtigkeit der Platten unmittelbar vor der Brandprüfung

5.3.2. Bohrkerndruckfestigkeit

Die Bohrkerndruckfestigkeit der Prüfkörper gibt Abbildung 28 wieder. Die Bohrkerndruckfestigkeiten liegen im erwarteten Rahmen in Korrelation zu den Luftporengehalten.

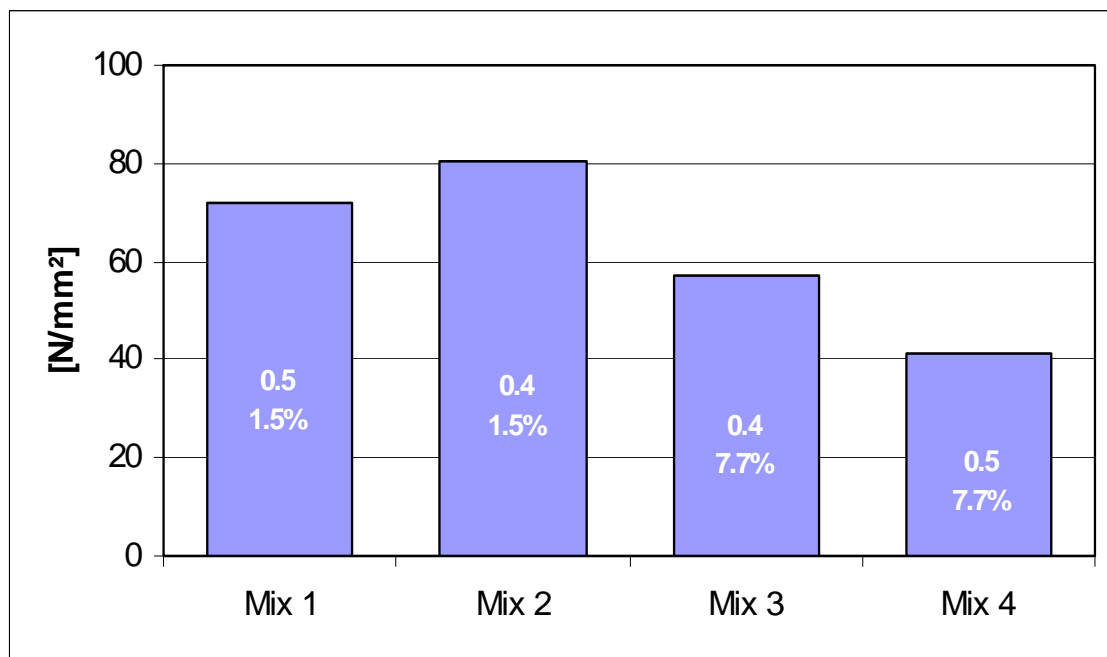


Abbildung 28: Bohrkerndruckfestigkeiten

5.3.3. Porosität

Die erreichten Porositäten sind in Abbildung 28 dargestellt. Der zu erwartende Anstieg der Porosität mit steigendem w/z-Wert ist deutlich zu erkennen.

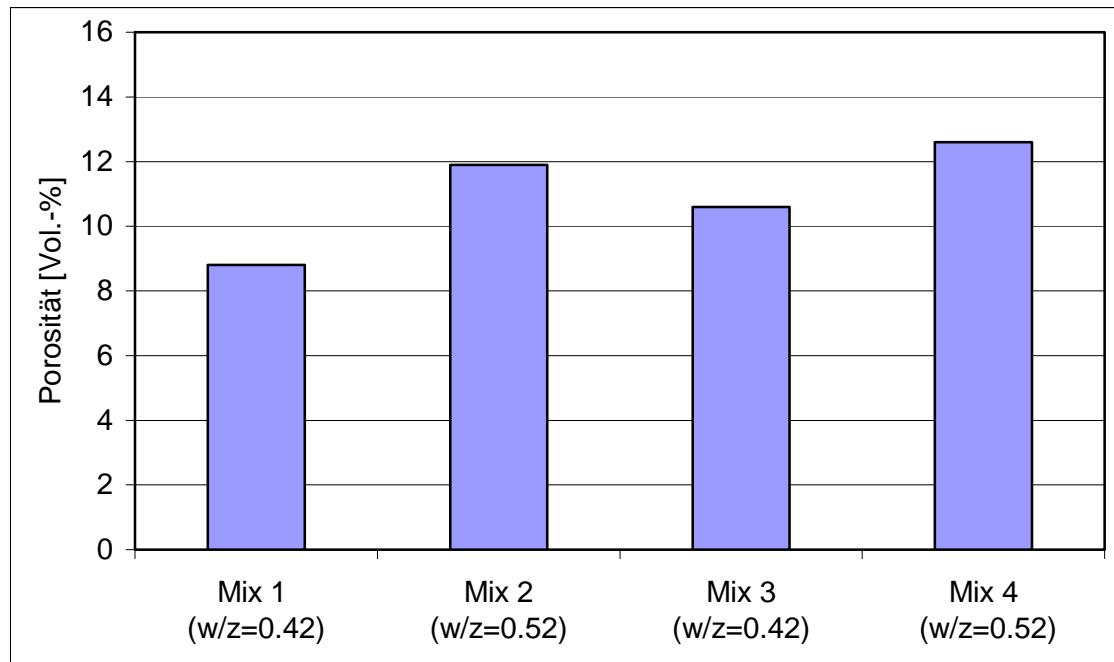


Abbildung 29: Porositäten der Prüfkörper

6. Zusammenfassung und Diskussion der Resultate

Bei allen Prüfkörpern sind Abplatzungen aufgetreten. Bei den Prüfkörpern mit hohem Luftporengehalt sind diese jedoch vernachlässigbar und somit nicht quantifiziert worden. Auch traten die meisten Abplatzungen unmittelbar nach Ende der Prüfung ein (Cold spalling).

Bei niedrigem w/z-Wert sind in beiden Versuchsserien höhere Abplatzvolumina gemessen worden (Tabelle 6). Dies korreliert mit den niedrigeren Porositäten dieser Mischung.

Probekörper	w/z	Porosität Vol-%]	Versuchserie 1 d=150 mm	Versuchserie 2 d=350 mm
			Abgeplatztes Volumen [cm ³]	Abgeplatztes Volumen [cm ³]
Mix 1	0.52	11.9	5800	15000
Mix 2	0.42	8.8	30500	102000

Tabelle 6: Abgeplatzte Volumina versus w/z-Wert

In Tabelle 6 ist auch zu erkennen, dass bei den dehnungsbehinderten und steiferen Prüfkörpern deutlich stärkere Abplatzungen aufgetreten sind. Die Abbildung 31 verdeutlicht den Sachverhalt.

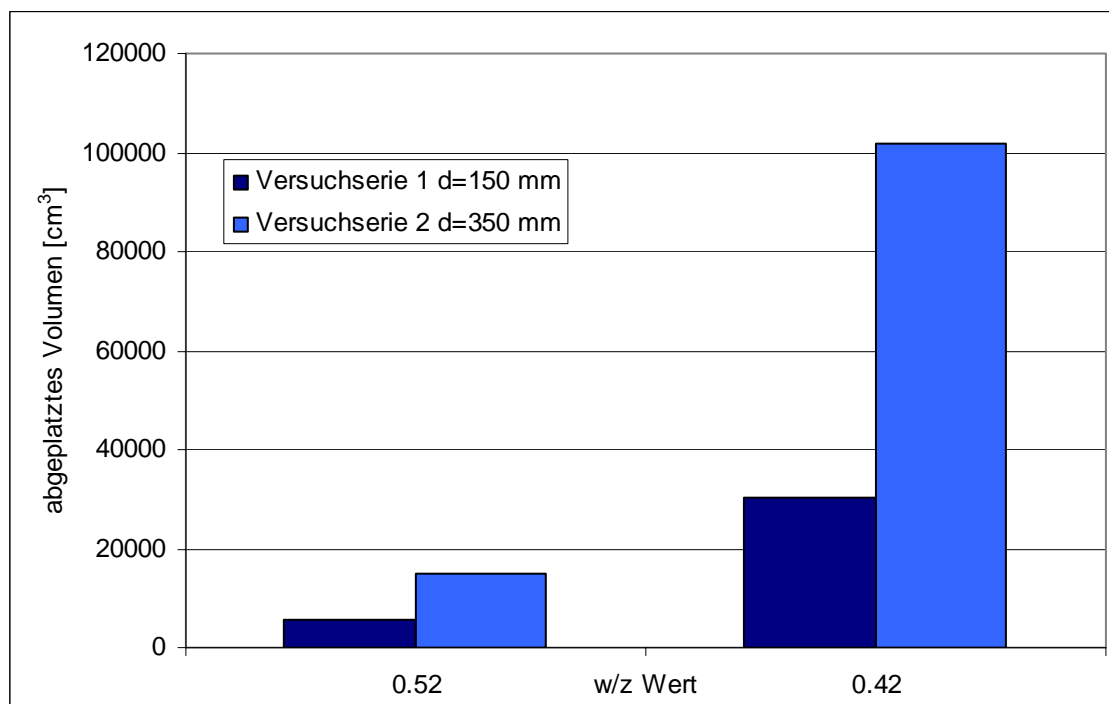


Abbildung 30: Einfluss der Dehnungsbehinderung auf die Abplatzrate

Weiter lässt sich aus den Untersuchungen ableiten, dass in den Ergebnisberichten von Brandwiderstandsprüfungen die geometrischen Daten des Prüflings wiedergegeben werden müssen. In Abbildung 31 sind die Abplatzbilder von Mix 2 mit unterschiedlichen Prüfkörperdicken vergleichend dargestellt. Das linke Bild suggeriert einen wesentlich besseren Brandwiderstand als das rechte Bild, obwohl beide Prüfkörper mit demselben Beton hergestellt worden sind.

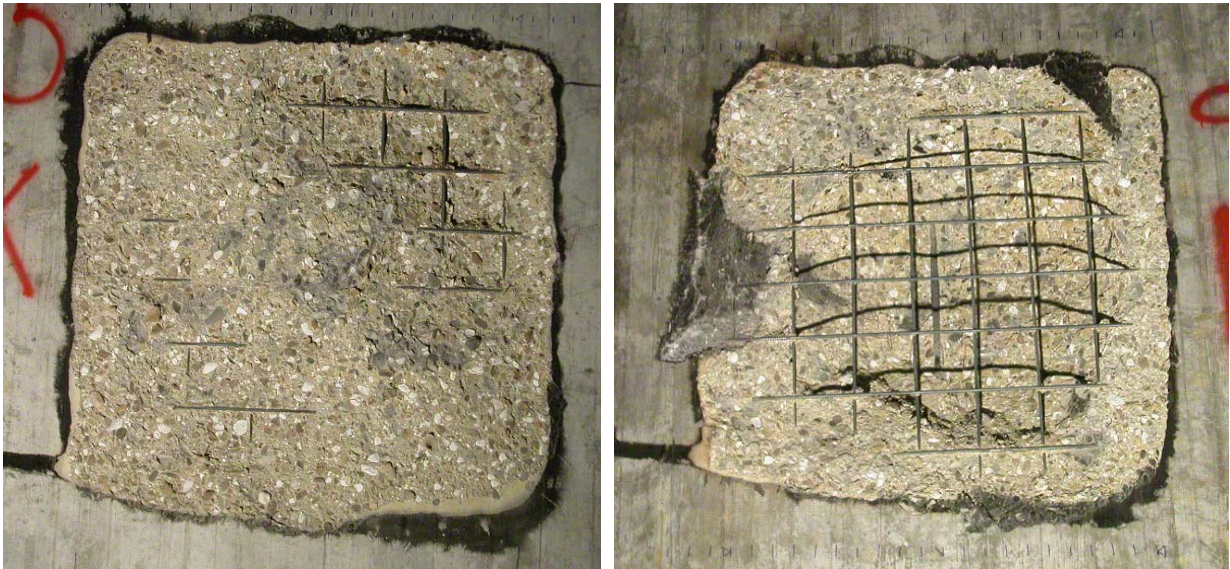


Abbildung 31: Prüfkörper Mix 2 nach der Brandprüfung, links mit $d=150$ mm und rechts mit $d=350$ mm

7. Ausblick

Die in der Zielsetzung postulierte These, dass mit dem w/z -Wert eine Steuerung des Brandwiderstands möglich ist, ist tendenziell bewiesen.

Mit den zum Untersuchungszeitpunkt zur Verfügung stehenden Methoden ist eine genauere Bestimmung kleinerer Abplatzraten nicht möglich. Daher sind die für die verwendete Methode infinitesimal kleinen Abplatzraten der 2. Versuchsserie in die Ergebnisse nicht eingeflossen.

Aus den Untersuchungen lässt sich die Forderung nach einer Überarbeitung der Prüfnormen ableiten. Eine Standardisierung der Prüfvorschriften kann durch weitere Untersuchungen statistisch abgesichert werden. Auch sind weitere Untersuchungen notwendig, um ein Rechenmodell zu entwickeln, dass die Ergebnisse unterschiedlicher geometrischer Prüfkörper vergleichen kann.

Daher ist der in diesen Untersuchungen aufgezeigte Weg näher zu untersuchen und statistisch über eine Reihenuntersuchung abzusichern.

Ferner zeigt sich quantitativ und qualitativ eine Senkung des Brandwiderstands durch Dehnungsbehinderung und grösserer Steifigkeit. Diese abgesicherte Erkenntnis gilt es nun in die Bau- und Prüfpraxis einfliessen zu lassen. Durch weitere Untersuchungen gilt es zu quantifizieren, ob die Dehnungsbehinderung oder die Prüfkörpersteifigkeit einen höheren Einfluss auf den Brandwiderstand hat.

Weitere Untersuchungen sollten sich mit dem Entwurf von brandwiderstandsgerechten Konstruktionsregeln beschäftigen. Diese sind dann mit anwendungsnahen Versuchen an Bauteilen abzusichern.

8. Literatur

8.1. Externe Quellen

- (1) Dipl.-Holzwirt P. Jagfeld, Dr. rer. nat. S. Lehner, Untersuchung des Brandverhaltens von Baustoffen mit dem Kleinbrenner T 2711, 1996
- (2) Materialprüfungsamt NRW, Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Brandverhaltens von Baustoffen T 2818/3, 1997
- (3) Wolfgang Bartknecht, Explosionsschutz Grundlage und Anwendung, 1993
- (4) Carola Steinert, Karl Kordina, Laborbrandversuche an Tunnelauskleidungssystemen Teil II, F&E-Vorhaben "Brandschutz in Verkehrstunnelanlagen", 1997
- (5) Gunther Brux, Bautechnische Massnahmen zur Brandschadenbeseitigung, 2000
- (6) DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, DIN 4102-1, 1998
- (7) Frank Papworth – Scancem Materials, Nylon Fibres Eliminate and Silica Fume does not increase the Risk of Explosive Spalling of HPC in Fire, 1998
- (8) Karl Weigler, Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau, 1989
- (9) Technische Forschungs- und Beratungsstelle der schweizerischen Zementindustrie, Beständigkeit von Beton bei höheren Temperaturen, 1979
- (10) Dr.-Ing. Huber, ZTV-Tunnel, Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Strassentunneln Teil 1, Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise), 1995
- (11) Eisenbahn-Bundesamt, Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln, 1997
- (12) C. Both, P. van de Haar, TNO Centre for Fire Research, G Tan & G Wolsink, Ministry of Public Works, Evaluation of passive fire protection measures for concrete tunnel linings
- (13) Bernhard Maidl, Stahlfaserbeton, 1991
- (14) ASTM Designation: E 84 – 97a, Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials1, 1997
- (15) ASTM Designation: E 162 – 94, Standard Test Method for Surface Flammability of Materials using a Radiant Heat energy Source1, 1997

- (16) Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Forschung für die Praxis P 145.2, Brände in Verkehrstunneln, 1998
- (17) Ir. G.L. Tan, Ing. P.W. van de Haar, Fire protection for Tunnels, Part 1: fire test procedure Draft, 1999
- (18) Eureka Projekt, Fire protection in traffic tunnels, 1996
- (19) A. Haack, Fire Protection in Traffic Tunnels: General Aspects and Results of the Eureka Project, 1999
- (20) ITA Working Group Report, Fire and Life Safety for Underground Facilities: Present Status of fire and Life Safety Principles Related to Underground Facilities, 1998
- (21) John R. Day, Fire Life Safety in Road Tunnels, 1999
- (22) Prof. ir. A. Glerum, Promat Bautechnischer Brandschutz in Tunnelbauwerken und unterirdischen Verkehrsanlagen
- (23) Perfotekt, Neue Brandschutzbekleidung für Verkehrstunnel
- (24) Dr. techn. Ulrich Trüb, Baustoff Beton, 1989
- (25) Prof. Dr.-Ing. Gerhard Mehlhorn, Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik und Brandschutz, 1997
- (26) Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, SN SIA 183, 1989
- (27) Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, SN SIA 160, 1989
- (28) DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 4102-1, 1998
- (29) DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 4102 Teil 2, 1977
- (30) DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 4102-16, 1998
- (31) DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 4102 Teil 8, 1986
- (32) Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina und Prof. Dr. Ing. C. Meyer-Ottens, Beton Brandschutz-Handbuch, 2. Auflage, 1999
- (33) Ekkehard Richter und Karen Paliga, Erkenntnisse aus Tunnelbränden zum konstruktiven Brandschutz, 1999
- (34) Fibrin Ltd., Fibre Technology, 2000
- (35) K. Paliga, A. Schaab, Vermeidung zerstörender Betonabplatzungen bei Tunnelbränden, Bauingenieur Band 77, Juli/August 2002

- (36) Brandschutz in Verkehrstunnelanlagen – Fahrzeugbrandversuche in Norwegen. FuE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Förderkennzeichen 13RG9004/2, 1990
- (37) P. Kalifa; F.-D. Menneteau; D. Quenard, Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. Cement and Concrete Research 30, 2000
- (38) J. Dahl; E. Richter, Brandschutz im einschaligen Tunnelausbau - Neuentwicklung zur Vermeidung von Betonabplatzungen, Tunnel 9, 2001
- (39) U. Diederichs; U.-M. Jumppanen; T. Morita; P. Nause; U. Schneider, Zum Abplatzverhalten von Stützen aus hochfestem Normalbeton unter Brandbeanspruchung. iBMB der TU Braunschweig 1994. Forschungsarbeiten 1990-1994
- (40) K. Paliga, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Ursachen für Betonabplatzungen bei Tunnelbränden. Braunschweig, Dissertation in Vorbereitung
- (41) U. Schneider; G. König; F. Dehn; J. Horvath, Versuche zum Brandverhalten von Tunnelinnenschalenbeton mit Faserzusatz. Bautechnik 78, 2001
- (42) P. Kalifa; G. Chéné; C. Gallé, High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. From spalling to microstructure. Cement and Concrete Research 31, 2001
- (43) S. Wiese, Faseroptische chemische Sensoren zur Überwachung von Betonbauwerken, TU Braunschweig, Diss., 2001
- (44) U. Schneider, H.J. Herbst, Permeabilität und Porosität von Beton bei hohen Temperaturen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 403, 1989
- (45) G.R. Consolazio; M.C. McVay; J.W. Rish, Measurement and Prediction of Pore Pressure in Cement Mortar Subjected to Elevated Temperature. Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete. NIST, Gaithersburg, MD, 1997
- (46) P.E. Roelfstra, Der numerische Beton, Lausanne, Diss., 1985
- (47) F. Grossmann, Spannungen und bruchmechanische Vorgänge im Normalbeton unter Zugbeanspruchung, Braunschweig, Diss., 1987
- (48) E.J. Garboczi; K.A. Snyder; J.F. Douglas, Geometrical percolation threshold of overlapping ellipsoids. Phys. Rev. E 52, 1995
- (49) Duurzaamheidsaspecten van beton met polypropyleenvezels, TNO, 2000, Rapport 2000-BT-MK-R0062/01
- (50) Tastversuche zum "Einfluss von Fasern auf Druck- und Biegezugfestigkeit sowie auf Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton", Institut für Bautechnologie GmbH 1989, Untersuchungsbericht Nr. 005/89, Readymix Beton AG

- (51) Dr.-Ing. Hans-Wilhelm Dorgarten, Leiter HOCHTIEF Consult; Dipl.-Ing. Johannes Dahl, Leiter Fachbereich Forschung und Entwicklung, HOCHTIEF Construction AG; Dipl.-Ing. Andreas Schaab, Betriebsleiter Versuchshalle Walldorf, HOCHTIEF Construction AG, Forschung + Praxis 40, U-Verkehr und unterirdisches Bauen, Tunnel - Lebensadern der mobilen Gesellschaft, STUVA Tagung 2003
- (52) A. Haack, Akutelle Sicherheitsfragen in Tunnel, Vortrag zur STUVA-Tagung 1999, Tunnel 5/2000
- (53) H. Balthaus; J. Dahl, Neue Wege beim Brandschutz im Tunnelbau, Bautechniktag 2003
- (54) Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING Teil 5 Tunnelbau, Bundesanstalt für Strassenwesen (Hrsg.), Verkehrsblatt-Verlag, Stand 01/2003
- (55) C. Both; G.M.Wolsink/A.J. Breunese, Spalling of concrete tunnel linings in fire; (Re) Claiming the Underground Space, Saveur (ed.), 2003, Swets & Zeitlinger, Lisse
- (56) J. Dahl; E. Richter, Brandschutz: Neuentwicklungen zur Vermeidung von Betonabplatzungen, Tunnel 6/2001
- (57) A. Haack, Kommentar zum neu entwickelten Brandschutz im einschaligen Tunnelausbau, Tunnel 6/2001
- (58) K. Kordina; Cl. Meyer-Ottens; E. Richter, Beton-Brandschutz-Handbuch, 2. Auflage, Verlag Bau + Technik 1999
- (59) Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln; Richtlinie, Eisenbahnbundesamt EBA, Referat 24, Bonn: Ausgabe 01.1997
- (60) G. Khoury; C. Majorana, Effect of Heat on Concrete, Udine, 09.-13. Juni 2003

8.2. Veröffentlichungen der VersuchsStollen Hagerbach AG

- Seirer, S. J. (2005), *Fiber-modified concrete – case history of fire tests*, fib Symposium „Keep concrete attractive“, Budapest (H), May 2005.
- Seirer, S. J., Wetzig V., (2005) *Advanced studies on fire propagation in a motorway tunnel – case history of large scale fire tests*, ITA-AITES Welt Tunnel Congress, Istanbul (TR), Mai 2005.
- Seirer, S. J. (2004), *Fire test on fiber-modified concrete*, „Fire design of concrete: What now? What next?“, Mailand (I), Dezember 2004.
- Seirer, S. J. (2004), *Erhöhung des Brandwiderstandes von Beton durch die Zugabe von PP-Fasern*, Tunnelsicherheitstagung VersuchsStollen Hagerbach, Flums (CH), Oktober 2004.

- Wetzig V. (2003), *Fire protection in tunnels*, Summerschool on Ration Tunnelling, Universität Innsbruck, September 2003, Österreich
- Wetzig V., Seirer S. J. (2002), *CST Centre for Safety in Tunnels*, Fourth International Conference Basel, Switzerland (2002)
- Wetzig V., Xiao S. (2002), *Research on Fire Protection at the VSH Hagerbach Test Gallery, Development of fire resistant concrete and shotcrete*, International Seminar on Tunnel and Road Technology, Beijing, China, 2002
- Wetzig V., Amberg F. (2002), *Feuerwiderstand verschiedener Spritzbetone*, Spritzbetontechnologie 2002, Alpbach Tirol
- Wetzig V. (2001), *VSH Fire Protection Centre*, Third International Conference & One Day Seminar Tunnel Fires, Gaithersburg, Washington D.C., USA, 2001
- Wetzig V. (2001), *Destruction Mechanisms in Concrete Material in Case of Fire, and Protection Systems*, Fourth International Conference, Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid, Spanien, 2001
- Wetzig V. (2000), *Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit*, Fachzeitschrift "Schweizer Ingenieur Architekt SI+A", Nr. 43, Zürich, 2000
- Wetzig V. (2000), *Zerstörungsmechanismen bei Werkstoff Beton in Brandfall und Schutzsysteme*, Internationale Fachzeitschrift für unterirdisches Bauen, "Tunnel" Nr. 7, Gütersloh, Deutschland, 2000