

Jochen Reiners, Christoph Müller, Düsseldorf

# Einfluss der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Zementstein auf das Trocknungsverhalten von Zementestrich und das Abplatzverhalten von Beton im Brandfall, Teil 2

## Influence of the chemical and physical properties of hardened cement paste on the drying behaviour of cement screed and the spalling behaviour of concrete in the case of fire, part 2

39

### Übersicht

Im vorliegenden Teil 2 des Berichts werden die Ergebnisse von rechnergestützten Simulationen zu Feuchteverteilungen in Betonbauteilen verschiedener Zusammensetzung unter definierten Umgebungsbedingungen zusammengefasst. Des Weiteren beschreibt Teil 2 die Versuche zum explosiven Abplatzen von Beton.

### 1 Untersuchte Betonzusammensetzungen

Bei der Festlegung der Betonzusammensetzungen für das Versuchsprogramm wurde zunächst eine Referenzzusammensetzung festgelegt, die mit fünf verschiedenen Zementen hergestellt wurde. Ausgehend von dieser Referenzzusammensetzung wurden eine Reihe von Parametern variiert, die das Porengefüge im Beton beeinflussen. Neben der Variation der Gesteinskörnung, der Sieblinie, dem Zementgehalt und dem Wasserzementwert wurden bei einigen Betonen Zusatzstoffe und Zusatzmittel wie Silicastaub, LP-Bildner und superabsorbierende Polymere (SAP) verwendet. Letztere wurden gemäß Herstellerempfehlung mit 0,2 M.-% des Zementgehalts dosiert und vor der Betonherstellung mit dem Zement homogenisiert. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Betonzusammensetzungen sowie die jeweils ermittelte Betondruckfestigkeit, bestimmt im Alter von 28 Tagen an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm bei Lagerung gemäß [1].

### 2 Simulation zur Bestimmung der Feuchteverteilung in Betonbauteilen

Um die Feuchteverteilung in Betonbauteilen unter typischen Umgebungsbedingungen realitätsnah abschätzen zu können, sind neben der Kenntnis der Materialeigenschaften des Betons die Umgebungsbedingungen, wie sie in Innenräumen oder an der Außenluft zu verschiedenen Jahreszeiten üblicherweise auftreten, zu definieren. Da natürliche Umgebungsbedingungen und ihre Veränderung im Jahresablauf nur schwierig im Labor nachgestellt werden können, wurden hierzu typische Umgebungsbedingungen (Temperaturen, relative Luftfeuchten, Sonneneinstrahlungen und Regenereignisse) rechnergestützt simuliert und der hieraus resultierende Feuchtegehalt im Beton mit einer entsprechenden Software berechnet. Hierzu wurde die am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelte Software WuFi (= „Wärme und Feuchte instationär“) verwendet [2].

### Abstract

Part 2 of this report summarizes the results of computer-aided simulations of moisture distributions in concrete elements of different compositions under defined environmental conditions. Part 2 also describes the tests for explosive spalling of concrete.

### 1 Concrete compositions investigated

With regard to the choice of the concrete compositions for the experimental programme, a reference composition was first specified and produced with five different cements. Taking this reference composition as a basis, a number of parameters which influence the pore structure in the concrete were varied. Alongside variation of the aggregate, the grading curve, the cement content and the water-cement ratio, use was made, with certain concretes, of additives and admixtures such as silica fume, air-entraining agents and superabsorbent polymers. As recommended by the manufacturer, the amount of SAP added was 0.2 mass % of the cement content. This was homogenised with the cement before making the concrete. Table 1 gives an overview of the concrete compositions and the concrete compressive strength established for each, determined at an age of 28 days on cubes with an edge length of 150 mm stored in accordance with [1].

### 2 Simulation for determination of moisture distribution in concrete components

In order to be able to realistically estimate the moisture distribution in concrete components under typical ambient conditions, it is necessary to not only have information on the material properties of the concrete, but also to define the ambient conditions generally prevailing indoors or outdoors at different times of year. As it is difficult to simulate natural ambient conditions and changes in these over the course of the year in a laboratory, computer-aided simulation was performed for the typical ambient conditions (temperatures, relative humidities, sunlight and rainfall) and the resultant moisture content of the concrete was calculated using appropriate software. Use was made for this purpose of the WuFi (dynamic heat and moisture simulation) software developed at the Fraunhofer Institute for Building Physics [2].

Für die rechnerische Simulation wurden

- die Sorptionsisothermen (d.h. der Feuchtegehalt im Gleichgewichtszustand in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft) nach [3],
- der Wasserdampfdiffusionswiderstand („dry cup“) nach [4] sowie
- der Wasseraufnahmekoeffizient bei teilweisem Eintauchen nach [5]

der in Tabelle 1 gezeigten Betone experimentell bestimmt.

Zum Zeitpunkt der Prüfung waren die Proben mindestens ein Jahr lang im Klima 20 °C/100 % r. F. gelagert worden, sodass von einem hohen Hydratationsgrad ausgegangen werden kann. Die Sorptionsisothermen wurden als Desorptionsisothermen ermittelt, d.h. zunächst feuchte Probekörper wurden in mehreren Schritten in jeweils geringere Luftfeuchten eingebracht. In Bild 1 sind die Desorptionsisothermen ausgewählter Betone dargestellt. Wie bereits in Teil 1 beschrieben, besteht ein Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und der maximalen Größe der bei dieser Luftfeuchte gefüllten Poren. Bei einem vergleichbaren Gesamtporenanteil hat Zementstein mit Portlandzement (CEM I) einen höheren Kapillarporenanteil und einen geringeren Gelporenanteil als Zementstein mit Hochofenzement (CEM III/A).

In ähnlicher Weise führt die Verwendung von Portlandflugaschezement (CEM II/B-V) aufgrund der puzzolanischen Reaktion der Flugasche nach entsprechender Hydratisierungsdauer zu einem im Vergleich zu Portlandzement (CEM I) oder Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL) reduzierten Kapillarporenanteil.

The computer-aided simulation involved experimental determination of

- The sorption isotherms (i.e. the moisture content in the state of equilibrium as a function of the relative humidity of the ambient air) in accordance with [3],
- The water vapour diffusion resistance („dry cup“) in accordance with [4] and
- The water absorption coefficient by partial immersion in accordance with [5]

for the concretes shown in Table 1.

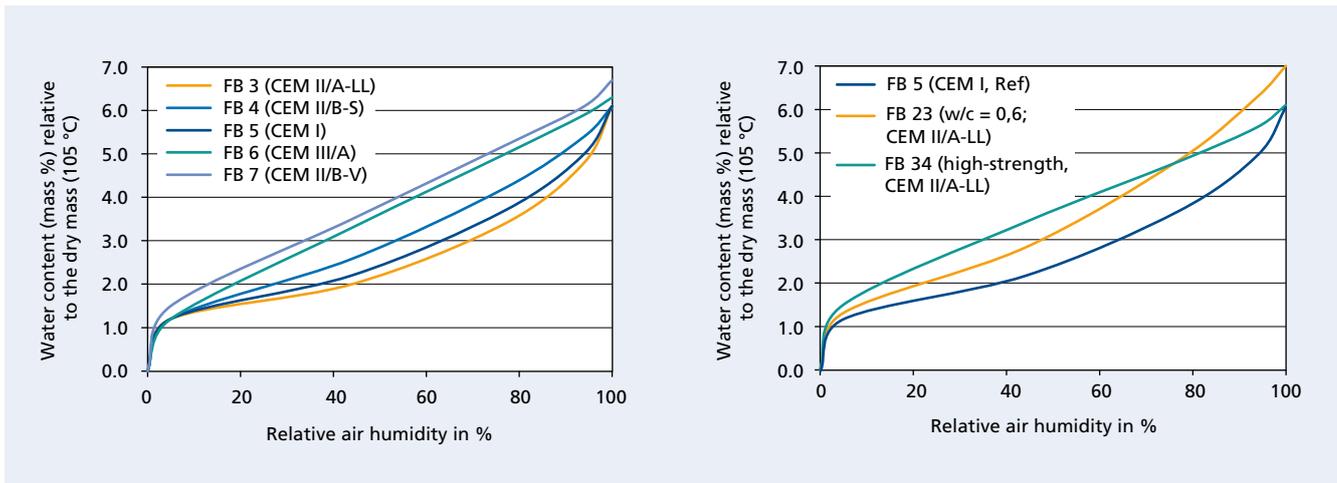
At the time of testing, the specimens had been in storage for at least one year at 20 °C/100 % relative humidity, so that a high degree of hydration can be assumed. The sorption isotherms were determined as desorption isotherms, i.e. initially moist test specimens were transferred in several stages to atmospheres with progressively lower humidity. The desorption isotherms of selected concretes are shown in Fig. 1. As already described in Part 1, a relationship exists between relative humidity and the maximum size of the filled pores at this humidity level. Given a comparable overall pore proportion, hardened cement paste with Portland cement (CEM I) has a larger proportion of capillary pores and a smaller proportion of gel pores than hardened cement paste with blast furnace cement (CEM III/A).

On account of the pozzolanic reaction of the fly ash, the use of Portland fly ash cement (CEM II/B-V) similarly results, after a corresponding hydration period, in a reduced capillary pore proportion as compared to Portland cement (CEM I) or Portland limestone cement (CEM II/A-LL). These differences in pore size

**Tabelle 1: Untersuchte Betonzusammensetzungen: Bezeichnungen sowie Würfeldruckfestigkeit (Mittelwert von drei Messungen an 150-mm-Würfeln, 28 Tage nach Betonherstellung)**

**Table 1: Concrete compositions investigated: designations and cube compressive strengths (average of three measurements on 150 mm cubes, 28 days after concrete production)**

Reference concrete composition: Cement content 350 kg/m <sup>3</sup> ; w/c = 0.55; Rhine sand/gravel B16					
Cement type	CEM I	CEM II/B-S	CEM II/A-LL	CEM II/B-V	CEM III/A
Reference concrete composition	FB5 43.7 N/mm <sup>2</sup>	FB4 44.0 N/mm <sup>2</sup>	FB3 48.9 N/mm <sup>2</sup>	FB7 50.0 N/mm <sup>2</sup>	FB6 48.7 N/mm <sup>2</sup>
As reference but with B8 grading curve	FB8 47.8 N/mm <sup>2</sup>	FB9 46.5 N/mm <sup>2</sup>		FB10 50.0 N/mm <sup>2</sup>	
As reference but with added air-entraining agent (approx. 5 vol. % air void content in the fresh concrete)	FB11 31.4 N/mm <sup>2</sup>		FB12 39.1 N/mm <sup>2</sup>		FB13 36.3 N/mm <sup>2</sup>
As reference but with added SAP (0.2 mass % w.r.t. cement)	FB14 45.2 N/mm <sup>2</sup>	FB15 42.4 N/mm <sup>2</sup>		FB16 45.5 N/mm <sup>2</sup>	
As reference but using B16 quartzitic double-crushed chippings	FB17 49.7 N/mm <sup>2</sup>			FB19 51.3 N/mm <sup>2</sup>	FB20 53.6 N/mm <sup>2</sup>
As reference but with added silica fume, 100 kg/m <sup>3</sup>	FB21 77.4 N/mm <sup>2</sup>	FB18 75.9 N/mm <sup>2</sup>	FB22 76.9 N/mm <sup>2</sup>		
As reference but w/c = 0.60			FB23 45.5 N/mm <sup>2</sup>	FB24 40.0 N/mm <sup>2</sup>	FB25 41.6 N/mm <sup>2</sup>
As reference but w/c = 0.50	FB26 56.6 N/mm <sup>2</sup>			FB27 56.4 N/mm <sup>2</sup>	FB28 57.1 N/mm <sup>2</sup>
As reference but cement content 400 kg/m <sup>3</sup>		FB29 44.9 N/mm <sup>2</sup>	FB30 52.2 N/mm <sup>2</sup>		FB31 48.3 N/mm <sup>2</sup>
450 kg/m <sup>3</sup> cement, 50 kg/m <sup>3</sup> silica fume, 175 l/m <sup>3</sup> water Rhine sand/gravel B16, superplasticizer	FB32 95.8 N/mm <sup>2</sup>	FB33 92.0 N/mm <sup>2</sup>		FB35 84.5 N/mm <sup>2</sup>	FB34 93.8 N/mm <sup>2</sup>



**Bild 1: Desorptionsisothermen ausgewählter Betone im Versuchsprogramm**  
**Figure 1: Desorption isotherms of selected concretes in the test programme**

Diese Unterschiede in der Porengrößenverteilung spiegeln sich unmittelbar im Verlauf der Desorptionsisothermen wieder: beim Vergleich von Betonen mit einem ähnlichen Gesamtporenvolumen weisen Betone mit einem höheren Kapillarporenanteil (und einem entsprechend geringeren Gelporenanteil) geringere Gleichgewichtsfeuchtegehalte als Betone mit einem höheren Gelporenanteil auf.

Die rechnerische Simulation mit der Software WuFi führte zu folgenden Ergebnissen:

- Im Inneren von Betonbauteilen im Hochbau stellt sich nach mehreren Jahren eine weitestgehend konstante relative Luftfeuchte ein, die der mittleren vorherrschenden relativen Luftfeuchte der Umgebung entspricht. Nur die Feuchte der äußeren Zentimeter eines Betonbauteils wird maßgeblich von Schwankungen des Klimas im Jahresverlauf beeinflusst. Je dichter der Beton ist, desto kleiner ist die Randzone, die durch Klimaschwankungen beeinflusst wird.
- Die relative Luftfeuchte, die sich im Bauteilinneren einstellt, entspricht
  - für Innenbauteile bei typischen Raumklimabedingungen ca. 50 % r.F.,
  - für ungedämmte Bauteile bei typischen Außenklimabedingungen (D) ca. 75 % r.F. bis 80 % r.F.; falls die Bauteile Regen ausgesetzt sind, auch höher.

Gedämmte Außenwände aus Beton können an der Betonaußenseite (d.h. zwischen Beton und Dämmung) in den Wintermonaten auch deutlich geringere relative Luftfeuchten aufweisen. Mithilfe der jeweiligen Sorptionsisotherme des Betons kann den relativen Feuchtegehalten der entsprechende Feuchtegehalt (in M.-%) über die Bauteildicke zugeordnet werden.

Für die im Versuchsprogramm untersuchten Betone gilt:

- Alle Betone zeigen im Außenklima nach Einstellung konstanter relativer Feuchten im Kern durchschnittliche Ausgleichsfeuchten in der Größenordnung von 3,5 M.-% bis 6,0 M.-%. Für Bauteile in offenen Parkhäusern oder Hallen wären bei Verwendung allgemeiner Bemessungsverfahren und dem Wert 3,0 M.-% für  $k$  im nationalen Anhang zu [6], also bei allen untersuchten Betonzusammensetzungen, genauere Untersuchungen zum explosiven Abplatzen erforderlich.
- Im Raumklima erreichen die untersuchten Betone nach Einstellung konstanter rel. Luftfeuchten im Kern durchschnittliche Ausgleichsfeuchten von 2,0 M.-% bis 4,5 M.-%. Ob bei einem Wert von 3,0 M.-% für  $k$  genauere Untersuchungen zum explosiven Abplatzen erforderlich wären, hängt also nach diesen Betrachtungen von der jeweiligen Betonzusammensetzung ab.

distribution are directly reflected by the profile of the desorption isotherms: comparison of concretes with a similar overall pore volume shows that concretes with a higher capillary pore proportion (and a correspondingly lower gel pore proportion) exhibit lower equilibrium moisture contents than concretes with a higher gel pore proportion.

Computer-aided simulation with the WuFi software yielded the following results:

- After several years, the relative humidity inside concrete components employed in building construction settles to a largely constant level corresponding to the average prevailing relative humidity of the surrounding area. Only the moisture in the outer few centimetres of a concrete component is decisively influenced by fluctuations in climatic conditions over the course of the year. The denser the concrete, the smaller the outer zone affected by climatic fluctuations.
- The relative humidity inside components settles at the following levels
  - Around 50 % relative humidity for interior components under typical indoor climatic conditions,
  - Around 75 % to 80 % relative humidity for non-insulated components under typical outdoor climatic conditions (D), and higher still if the components are exposed to rain.

Insulated outer concrete walls may also exhibit far lower relative humidities on the outer side of the concrete (i.e. between concrete and insulation) in the winter months. The applicable sorption isotherm of the concrete can be used to assign the corresponding moisture content (in mass %) to the relative moisture contents by way of the component thickness.

The following applies to the concretes investigated in the experimental programme:

- Under outdoor climatic conditions, all concretes exhibit average equilibrium moistures of the order of magnitude of 3.5 mass % to 6.0 mass % once the relative humidity has settled to a constant level in the core. If use is made of advanced calculation methods and the value 3.0 mass % for  $k$  in the national annex to [6], more precise investigations into explosive spalling would therefore be necessary for all the concrete compositions investigated for components in open multi-storey car parks or factory buildings.
- Under indoor climatic conditions, the concretes investigated attain average equilibrium moistures of 2.0 mass % to 4.5 mass % once the relative humidity has settled to a constant level in the core. Given these observations, the question as to whether more precise investigations into explosive spalling would be necessary with a value of 3.0 mass % for  $k$  therefore depends on the concrete composition concerned.

**3 Untersuchungen zum explosiven Abplatzen**  
**3.1 Versuchsbeschreibung**

Zur Untersuchung des Verhaltens der Betone beim Erhitzen und eines möglichen explosiven Abplatzens wurde ein Versuchsaufbau abgewandelt, der zum ersten Mal von Kalifa [7] beschrieben und seitdem von vielen Wissenschaftlern verwendet wurde. Der Versuch wird in einigen Quellen als „PTM-Versuch“ bezeichnet, da die Änderung von Porendruck, Temperatur und Masse erfasst wird:

Beim PTM-Versuch wird die Oberfläche eines Betonkörpers mit den Abmessungen 30 cm x 30 cm x 12 cm mit elektrischen Heizstrahlern erhitzt. Der Probekörper ist während des Versuchs auf einer Waage platziert, sodass der Masseverlust durch den Austritt vom Wasserdampf bzw. flüssigem Wasser erfasst werden kann. Des Weiteren werden die Temperaturen in verschiedenen Höhen des Probekörpers während des Erhitzens gemessen (Bild 2).

Zur Erfassung des Porendrucks im Beton wurden im VDZ Edelstahlröhrchen mit einem Außendurchmesser von 3,0 mm und einem Innendurchmesser von 2,0 mm in die Probekörper einbetoniert. Vor dem Betonieren wurde ein Draht mit passender Dicke in die Röhrchen geschoben, um ein Eindringen von Zementleim zu verhindern. Als Medium zur Druckübertragung wurde Silikonöl gewählt. Vor dem Beginn des PTM-Versuchs wurden die Drähte aus den Edelstahlröhrchen entfernt, die Röhrchen mit Druckluft ausgeblasen und langsam mit einer Spritze von unten nach oben so mit Silikonöl gefüllt, dass der Einschluss von Luft vermieden wurde. Wie [8] zeigt, ist der Einfluss der thermischen Dehnung des Öls auf das Ergebnis der Porendruckmessung vernachlässigbar gering.

Die Temperaturmessung erfolgte im VDZ mit Mantel-thermoelementen (Typ K) aus hitzebeständigem Edelstahl mit einem Durchmesser von 1,5 mm, die bei der Herstellung der Probekörper mit einbetoniert wurden.

Trotz der Vielzahl der in der Vergangenheit durchgeführten Versuche mit Probekörpergeometrien 30 cm x 30 cm x 12 cm kam es auch bei hochfesten Betonen und Betonen mit hohem Feuchtegehalten im PTM-Versuch in keinem Fall tatsächlich zum explosiven Abplatzen (Tabelle 2). Auch bei einer veränderten Probekörpergeometrie (Zylinder Ø 175 mm, d = 100 mm) trat bei nur einem von 27 Betonen explosives Abplatzen auf. Um aber eine Bewertung hinsichtlich der Ursachen des Abplatzens treffen zu können, wurde es für das vorliegende Forschungsprogramm für notwendig erachtet, Ergebnisse von Versuchen, bei denen

**3 Investigations into explosive spalling**  
**3.1 Description of testing**

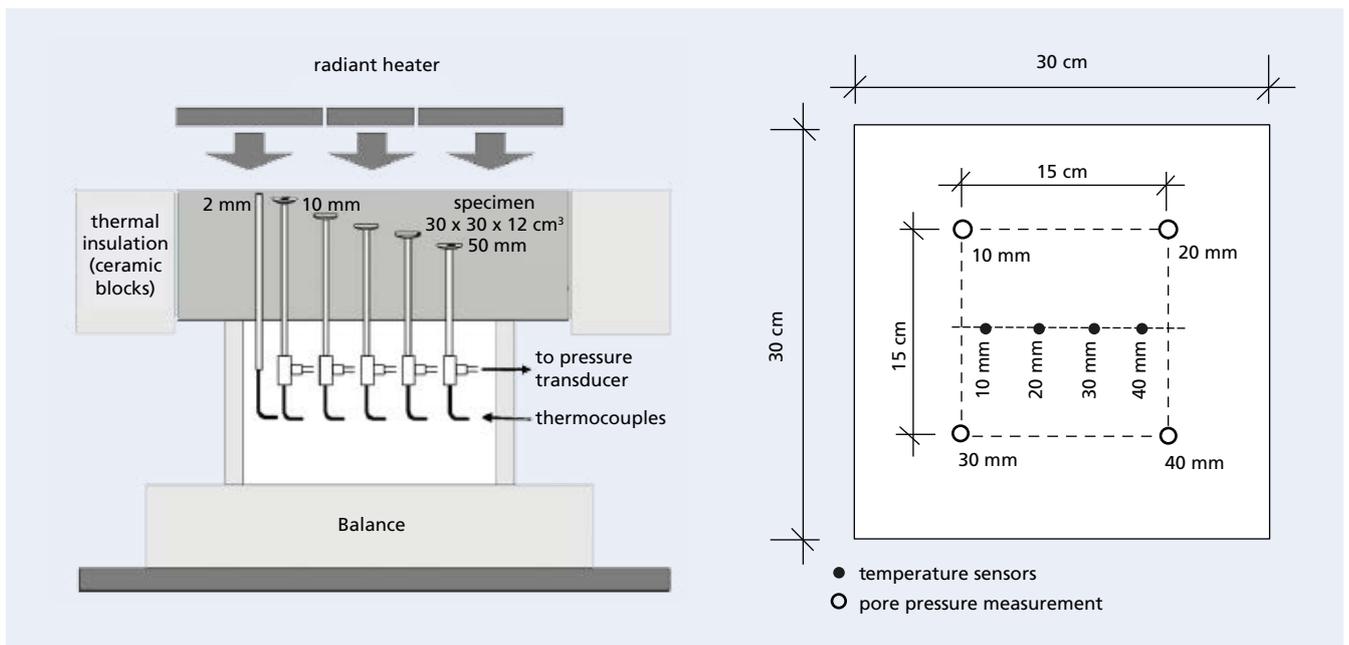
To study the behaviour of the concretes on heating, and possible explosive spalling, use was made of a modified test set-up first described by Kalifa [7] and subsequently employed by many scientists. Some sources refer to the method as „PTM test“ as it records the change in pore pressure, temperature and mass.

The PTM test involves heating the surface of a 30 cm x 30 cm x 12 cm concrete member with electric radiant heaters. During the test, the test specimen is placed on a balance to permit recording of the loss in mass due to the emergence of water vapour or liquid water. In addition, the temperatures are measured at various points along the height of the test specimen during heating (Fig. 2).

To record the pore pressure in the concrete, stainless steel tubes with an outer diameter of 3.0 mm and an inner diameter of 2.0 mm were set in concrete in the test specimens at VDZ. Before being set in concrete, a wire of appropriate thickness was inserted into the tubes to prevent the ingress of cement paste. Silicone oil was used as pressure transfer medium. Before the start of the PTM test, the wires were removed from the stainless steel tubes and the tubes were blown out with compressed air and slowly filled with silicone oil from bottom to top using a syringe so as to prevent the inclusion of air. As shown by [8], the influence of the thermal expansion of the oil on the result of the pore pressure measurement is negligible.

Temperature measurements were taken at VDZ using sheathed thermocouples (type K) made of heat-resistant stainless steel with a diameter of 1.5 mm, which were also set in concrete on producing the test specimens.

Despite the large number of tests performed in the past with test specimens measuring 30 cm x 30 cm x 12 cm, there has never actually been a case of explosive spalling occurring in a PTM test, even with high-strength concretes and concretes with high moisture content (Table 2). With a modified test specimen geometry (cylinder Ø 175 mm, d = 100 mm), explosive spalling only occurred with one in 27 concretes. In order to be able to assess the causes of spalling, it was however considered necessary for the purposes of this research project to be able to directly compare results from tests in which explosive spalling occurs with those from tests which produce no spalling. For this reason, at VDZ the test specimens were enclosed in a steel frame made of channel sections with the intention of preventing free expansion of the concrete and enabling compressive forces to be applied to the concrete. As it is



**Bild 2: Versuchsaufbau nach [7] (links) und Anordnung der Messpunkte im VDZ (rechts)**  
**Figure 2: Test set-up according to [7] (left) and positions of the test points at the VDZ (right)**

Tabelle 2: Übersicht von Veröffentlichungen zu durchgeführten „PTM-Versuchen“  
 Table 2: Summary of publications on “PTM tests” that have been carried out

Source	Number of tests	Concrete properties	Spalling yes/no
Test specimens 30 cm x 30 cm x 12 cm			
[7]	6	water/binder: 0.34...0.50; 28 d strength: 35 MPa...92 MPa moisture content: 3.0 %...3.9 %	no explosive spalling but 1...2 cm wide “flakes”, up to 5 mm thick with one concrete
[15]	12 (in some cases with PP fibres)	water/binder: 0.30; 28 d strength: 102 MPa...112 MPa moisture content: up to 3.0 %...3.2 %	no spalling
[11] [13]	15 (in some cases with PP fibres)	water/binder: 0.3 ...0.54; 28 d strength: 29 MPa...70 MPa moisture content: up to 5.5 %	no spalling
[16]	10	water/binder: 0.29...0.62, 28 d strength: 35 MPa...76 MPa moisture content: up to 2.8 %...3.8 %	no concrete spalling but local spalling of flint
[17]	12	water/binder: 0.54; 28 d strength: 37 MPa...43 MPa moisture content: 3.0 % to 3.8 %	no spalling
Changed specimen geometry:			
[18]	18 (in some cases with PP or steel fibres)	water/binder: 0.3; 28 d strength: 84 MPa...105 MPa moisture content: ?	spalling with one specimen, specimen geometry (Ø 175 mm, thickness = 100 mm)
[19]	18	water/binder: 0.3; 28 d strength: 89 MPa moisture content: up to 7 %	no spalling, changed specimen geometry (Ø 175 mm, thickness = 100 mm)
[20]	3 (in some cases with PP fibres)	water/binder: 0.30; 28 day strength: 86 MPa...104 MPa moisture content: ?	no spalling, specimen geometry (Ø 175 mm, thickness = 100 mm)

explosives Abplatzen auftritt, unmittelbar mit Versuchen vergleichen zu können, bei denen kein Abplatzen auftritt. Aus diesem Grund wurden die Probekörper im VDZ mit einem Stahlrahmen aus U-Profilen eingefasst, über den die freie Dehnung des Betons behindert und Druckkräfte auf den Beton aufgebracht werden konnten. Da aus der Literatur (z.B. [9]) bekannt ist, dass das Vorhandensein von Druckspannungen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von explosivem Abplatzen erhöht, war hiermit die Erwartung verbunden, dass es bei einigen der untersuchten Betone während der Prüfung zum Abplatzen kommen würde. Zudem sollten auf diese Art Versuchsbedingungen erzielt werden, die der Praxissituation eines Betonbauteils unter Brandbelastung besser entsprechen.

Bild 3 zeigt die Anordnung der Stahlprofile. Da die Länge der Profile auf zwei gegenüberliegenden Seiten so dimensioniert wurde, dass sie wenige Millimeter kürzer als die Probekörper selbst waren, konnten Druckkräfte über die Verschraubung der Stahlprofile eingeleitet werden. Die Anzugsmomente der Schrauben wurden dabei so gewählt, dass die Druckspannung ca. 10 % der ermittelten 28-Tage-Festigkeit der jeweiligen Betone betrug. In Querrichtung lag lediglich eine geringe Dehnungsbehinderung über Reibungskräfte an den Schrauben vor. An den Seiten der Stahlprofile wurde von außen hitzebeständige Mineralwolle angeordnet, um einen Wärmeabfluss zu den Seiten zu verringern und eine näherungsweise eindimensionale thermische Beanspruchung zu erzielen.

Tastversuche zeigten, dass wie erwartet bei einer durch den Stahlrahmen aufgebracht Druckkraft ein explosives Abplatzen des Betons beim Erhitzen auftreten konnte. Die empfindlichen Keramikstrahler mussten daher – anders als bei den in Tabelle 2 beschriebenen Versuchen – mittels einer stabilen Stahlgitterabdeckung vor abplatzenden Betonteilen geschützt werden. Die Heizstrahler und ihre Einhausung wurden so montiert, dass sie im

known from literature (e.g. [9]) that the presence of compressive stresses increases the probability of the occurrence of explosive spalling, the expectation was that spalling would take place in some of the concretes investigated during the test. A further aim of this approach was to create test conditions closer to the actual situation of a concrete component exposed to fire in practice.

Fig. 3 shows the arrangement of the steel sections. As the sections on two opposing sides were designed to be a few millimetres shorter in length than the actual test specimens, it was possible to introduce compressive forces via the bolted joint of the steel sections. The tightening torques of the bolts were selected such that

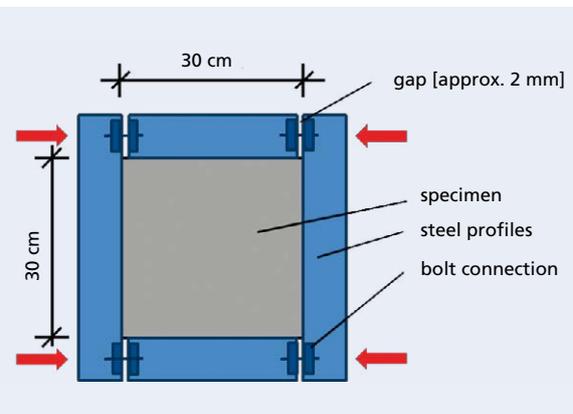


Bild 3: Aufbringen einer Druckbelastung auf den Probekörper bei den Versuchen im VDZ

Figure 3: Application of a compressive load on the specimen in the tests at the VDZ

Fälle des Abplatzens des Betons durch die freierdende Energie nach oben verschiebbar waren. Dadurch sollte eine Beschädigung der Strahler verhindert werden.

Die Probekörper mit den Abmessungen 30 cm x 30 cm x 12 cm wurden nach ihrer Herstellung mindestens ein Jahr im Klima 20 °C/100 % r.F. gelagert, sodass die Hydratation bei Versuchsbeginn weitestgehend abgeschlossen war. Danach wurden sie in das Klima 20 °C/65 % r.F. umgelagert. Vor der Umlagerung wurden die Proben an ihren Seitenflächen mit einer Metallfolie so abgedichtet, dass die Trocknung nur zur Ober- und Unterseite stattfinden konnte. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt der Prüfung eine weitgehend eindimensionale Feuchteverteilung in den Probekörpern vorlag. Die Heizstrahler wurden bei fast allen Versuchen (Ausnahmen: s. Abschnitt 3.4) so gesteuert, dass sie schnellstmöglich eine Temperatur von 750 °C erreichten. Das war nach ca. 13 Minuten der Fall. Damit war eine Aufheizrate von ca. 20 °C/min (gemessen an der Betonoberfläche) bei Versuchsbeginn verbunden. Zusätzlich zur Temperaturmessung am mittleren Heizstrahler und in den Probekörpern wurde ein Temperaturfühler (Typ K) auf die Oberseite der Proben lose aufgelegt. Diese Messung ist durch die Wärmestrahlung des Betons beeinflusst.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der untersuchten Probekörper. Angegeben sind das Alter der Probekörper beim PTM-Versuch sowie die Dauer der Lagerung im Klima 20 °C/65 % r. F. vor der Prüfung. Bei allen Versuchen, die dunkel schattiert dargestellt sind, trat explosives Abplatzen auf. Die Probekörper FB 34 und FB 35 wurden vor dem Versuch 28 Tage im Klima 40 °C/10 % r. F. gelagert, um den Einfluss einer intensiven Trocknung auf das Versuchsergebnis zu untersuchen. Bei diesen Betonen kam es nicht zum Abplatzen.

### 3.2 Ergebnisse der Messung von Masse, Druck und Temperatur im PTM-Versuch

Für diese Versuche unter einseitiger Druckbelastung mit einer Maximaltemperatur des Heizstrahlers von 750 °C traten keine deutlichen und systematischen Unterschiede im Verlauf der Massen- und Porendruckentwicklung der Betone auf. Insbesondere konnten nicht die von anderen Wissenschaftlern gezeigten Zusammenhänge zwischen höheren Betonfestigkeiten und höheren Betonfeuchtegehalten auf der einen und höheren Porendrücken auf der anderen Seite festgestellt werden.

In Bild 4 ist ein typischer Verlauf der Entwicklung von Masse, Temperatur und Druck für den Fall dargestellt, dass kein Abplatzen auftrat. Folgende Beobachtungen wurden gemacht:

- *Masseänderung der Probekörper (Bild 4 unten rechts)*  
Durch den Austritt dampfförmigen und flüssigen Wassers verloren die Betonproben während des Versuchs deutlich an Masse. Häufig kam es nach ca. 15 Minuten beim Verlauf der Masseänderung über die Zeit zu deutlichen Ausschlägen, was auf das Auftreten von Rissen und einen damit verbundenen größeren Wasseraustritt hinweist. Die Geschwindigkeit der Masseänderung nahm näherungsweise linear zu, bis sie nach etwa 50 Minuten einen konstanten Wert von ca.  $(12 \pm 2)$  g/min annahm. Dieser Zeitpunkt stimmte ungefähr mit dem Maximum des Porendrucks (Bild 4 rechts oben) überein.
- *Temperaturentwicklung (Bild 4 links oben und unten)*  
Etwa 1 Stunde nach Versuchsbeginn wurde an der den Heizstrahlern zugewandten Betonoberfläche im Abstand von 1 cm eine Temperatur von ca. 350 °C gemessen. Bei den Temperaturkurven sind „Plateaus“ erkennbar (Bild 4 links oben) die sich auch als „Täler“ in den Kurven für die zeitliche Temperaturänderung  $dT/dt$  (Bild 4 links unten) widerspiegeln, d.h. in diesen Zeiträumen kam es nur zu geringen Temperaturveränderungen an den entsprechenden Messpunkten. Diese Plateaus können mit dem Energiebedarf für das Verdampfen flüssigen Porenwassers begründet werden, der den Temperaturanstieg verlangsamt.
- *Porendruck (Bild 4 rechts oben) und austretendes Wasser*  
Die Maxima der gemessenen Porendrücke lagen bei fast allen Versuchen zwischen 0,4 MPa und 0,8 MPa (für das Beispiel in

the compressive stress corresponded to approx. 10 % of the 28-day strength determined for each of the concretes.

In transverse direction there was only little restraint to movement caused by frictional forces acting at the bolts. Heat-resistant mineral wool was placed from the outside against the sides of the steel sections to reduce heat dissipation to the sides and to approximate one-dimensional thermal loading.

Tentative tests showed that, as expected, explosive spalling of the concrete could occur on heating if a compressive force was applied through the steel frame. In contrast to the tests described in Table 2, it was therefore necessary to fit a solid steel grille to protect the sensitive ceramic heaters against concrete fragments breaking off. The radiant heaters and their enclosure were installed in such a way that they could be moved upwards by the energy released in the event of spalling of the concrete. This was intended to prevent damage to the heaters.

After being produced, the test specimens measuring 30 cm x 30 cm x 12 cm were stored for at least one year at 20 °C/100 % relative humidity, so that the hydration process was largely completed by the start of testing. After this period, they were transferred to storage at 20 °C/65 % relative humidity. Before being moved, the side surfaces of the specimens were sealed with a metal foil so that drying could only take place via the upper and lower surfaces. It can therefore be assumed that at the time of testing, the moisture distribution in the test specimens was largely one-dimensional. In virtually all the tests (exceptions: see Section 3.4), the radiant heaters were regulated such that they attained a temperature of 750 °C in the shortest possible time. This was the case after approx. 13 minutes. The associated heating rate at the start of the test was approx. 20 °C/min (measured at the surface of the concrete). In addition to temperature measurement at the middle radiant heater and in the test specimens, a temperature sensor (type K) was placed loosely on the top of the specimens. This measurement is influenced by the heat radiating from the concrete.

Table 3 gives an overview of the test specimens investigated. It indicates the age of the test specimens in the PTM test and the duration of storage at 20 °C/65 % relative humidity prior to testing. Explosive spalling occurred in all the tests shown against a dark background. Test specimens FB 34 and FB 35 were stored at 40 °C/10 % relative humidity for 28 days prior to the test to investigate the influence of intensive drying on the test result. Spalling did not occur with these concretes.

### 3.2 Results of mass, pressure and temperature measurement in the PTM test

For these tests with one-sided compressive load and a maximum radiant heater temperature of 750 °C, no distinct and systematic differences were found over the course of mass and pore pressure development of the concretes. In particular, no evidence was seen of the relationships established by other scientists between greater concrete strengths and higher concrete moisture contents on the one hand and greater pore pressures on the other.

Fig. 4 shows a typical mass, temperature and pressure development profile for a case with no occurrence of spalling. The following observations were made:

- *Change in mass of the test specimens (Fig. 4 bottom right)*  
On account of the emergence of vapour and liquid water, the concrete specimens underwent a distinct loss of mass during the test. Distinct peaks often appeared after approx. 15 minutes in the mass change versus time curve, which is an indication of the occurrence of cracks and the associated emergence of greater quantities of water. There was an approximately linear increase in the rate of mass change until it attained a constant value of approx.  $(12 \pm 2)$  g/min after around 50 minutes. This point in time roughly coincided with the maximum pore pressure (Fig. 4 top right).
- *Temperature development (Fig. 4 top and bottom left)*  
Around 1 hour after the start of the test, a temperature of approx. 350 °C was measured at a distance of 1 cm from the surface of the concrete facing the radiant heaters. „Plateaus“ can be seen in the temperature curves (Fig. 4 top left) which are

**Tabelle 3: Übersicht der im VDZ durchgeführten „PTM-Versuche“ (Bezeichnung: Alter des Probekörpers (d)/davon Lagerung in 20° C/65 % RH (d); Zeitpunkt des Abplatzens nach Testbeginn, Masse des abgeplatzten Betons, betroffener Anteil der Probekörperoberfläche)**  
**Table 3: Summary of the “PTM tests” carried out at the VDZ (designation: age of specimen (d)/of which storage at 20° C/65 % RH (d); time of spalling after start of test, mass of spalled concrete, percentage of surface affected)**

Reference concrete composition: Cement content 350 kg/m <sup>3</sup> , w/c = 0.55, Rhine sand/gravel B16					
Cement type	CEM I	CEM II/B-S	CEM II/A-LL	CEM II/B-V	CEM III/A
Reference concrete composition	FB5 700 d/225 d no spalling	FB4 789 d/156 d no spalling	FB3, 600°C 924 d/282 d no spalling	FB7 918 d/208 d 24 min, 400 g, 40 %	FB6 696 d/234 d 27 min, 1200 g, 80 %
As reference but B8 grading curve	FB8 846 d/132 d no spalling	FB9 727 d/226 d no spalling		FB10 761 d/161 d no spalling	
As reference but with added air-entraining agent (approx. 5 vol. % air void in the fresh concrete)	FB11, 600 °C 879 d/284 d no spalling		FB12 690 d/240 d no spalling		FB13 907 d/215 d no spalling
As reference but with added SAP (0.2 mass % w.r.t. cement)	FB14 764 d/178 d no spalling	FB15 908 d/216 d no spalling		FB16 641 d/201 d 27 min, 600 g, 30 %	
As reference but using B16 quartzitic double-crushed chippings		FB17 906 d/226 d no spalling		FB19 837 d/269 d no spalling	FB20 696 d/274 d no spalling
As reference but with added silica fume 100 kg/m <sup>3</sup>	FB21 693 d/280 d no spalling	FB18 771 d/112 d no spalling	FB22 853 d/294 d no spalling		
As reference but w/c = 0.60			FB23 790 d/126 d no spalling	FB24 649 d/244 d no spalling	FB25 818 d/266 d no spalling
As reference but w/c = 0.50	FB26 694 d / 147 d no spalling			FB27 650 d/250 d no spalling	FB28 848 d/198 d 29 min, 600 g, 50 %
As reference but cement content 400 kg/m <sup>3</sup>		FB29 684 d/286 d no spalling	FB30 690 d/290 d no spalling		FB31 664 d/167 d 34 min, 1300 g, 50 %
450 kg/m <sup>3</sup> cement, 50 kg/m <sup>3</sup> silica fume, 175 l/m <sup>3</sup> water Rhine sand/gravel B16, superplasticizer	FB32 556 d/147 d 30 min, 320 g, 35 %	FB33 448 d/70 d 29 min, 500 g, 35 %		FB35 573 d/180 d*) no spalling	FB34 579 d/186 d*) no spalling

\*) of which 28 d in a 40 °C/10 % r.h. climate

Bild 4 rechts oben bei ca. 0,53 MPa) und waren damit deutlich geringer als die gemessenen maximalen Porendrücke an anderer Stelle (Tabelle 2), welche häufig 4 MPa überschritten. Ein systematischer Einfluss der Betonzusammensetzung bzw. der Vorlagerung auf den Porendruck war nicht erkennbar. Meist wurde der höchste Porendruck weniger als 1 h nach Versuchsbeginn in 2 cm Abstand von der Betonoberfläche gemessen. Für die geringeren Porendrücke ist vermutlich eine vermehrte Rissbildung in den Betonen, verursacht durch

- die Erwärmungsgeschwindigkeit sowie
- das Aufbringen der Druckkraft

verantwortlich. Über den Druck, der einachsrig auf Beton aufgebracht wird, wird einerseits das Auftreten von Rissen in Druckrichtung erschwert, andererseits wird aber die Entstehung von Rissen in Querrichtung begünstigt. Es kann angenommen werden, dass die Risse in Querrichtung einen leichteren Wasseraustritt aus dem Beton ermöglichen, was mit einem Abbau des Porendrucks verbunden ist. Bestärkt wird diese Vermutung durch die Beobachtung von flüssigem Wasser, das während des Versuchs von der Unterseite der Probekörper abtropfte. Dies trat zum einen an den Positionen der Temperatur- und Druckfühler, zunächst an den Fühlern in 1 cm Tiefe, dann zeitlich versetzt bei 2 cm, 3 cm und schließlich an den Fühlern mit in 4 cm Tiefe auf. Ungefähr zeitgleich mit dem Sichtbarwerden von Wasser bei den Fühlern in 1 cm Tiefe von der Oberfläche zeigte

reflected as „valleys“ in the curves for the change in temperature over time  $dT/dt$  (Fig. 4 bottom left), i.e. only slight changes in temperature occurred at the corresponding measurement points in these periods. These plateaus can be explained by the energy demand for evaporation of the liquid pore water, which slowed down the temperature increase.

#### ■ Pore pressure (Fig. 4 top right) and emergence of water

In virtually all the tests, the maximum values of the measured pore pressures were between 0.4 MPa and 0.8 MPa (approx. 0.53 MPa for the example in Fig. 4 top right) and were thus well below the maximum pore pressures measured elsewhere (Table 2), which often exceeded 4 MPa. The concrete composition and preliminary storage had no apparent systematic influence on the pore pressure. In most cases the greatest pore pressure was measured less than 1 h after the start of the test at a distance of 2 cm from the surface of the concrete.

The increased crack formation in the concretes caused by

- The heating rate and
- The application of compressive force

was presumably responsible for the lower pore pressures. The uniaxial application of pressure on the concrete on the one hand hinders the occurrence of cracks in the direction of the pressure, but at the same time promotes the formation of cracks in transverse direction. It can be assumed that the cracks in transverse direction make it easier for water to emerge from the

sich auch flüssiges Wasser, das zwischen den Stahlprofilen und den senkrecht zur Richtung der Druckbelastung liegenden Seiten der Probekörper austrat (Bild 5). An den parallel zur Belastungsrichtung liegenden Seiten des Probekörpers kam es hingegen nicht zum Abtropfen von Wasser.

Eine Erklärung für diese Beobachtung zeigt Bild 6. Das Wasser, das an der Unterseite sichtbar wird, dürfte von der Seite der erhitzten Oberfläche des Probekörpers nach innen diffundierender Wasserdampf sein, der in den noch kühleren Bereichen kondensiert und dann an den Rissen auf den Seitenflächen des Betons austritt. Wie zuvor erläutert, verhindert die Druckkraft das Entstehen von Rissen in der Ebene senkrecht zur Belastungsrichtung. Diese Erklärung konnte durch Versuche ohne einseitige Druckbelastung (s. Abschnitt 3.5) gestützt werden.

**3.3 Auftreten von explosivem Abplatzen im „PTM-Versuch“**

Beim Aufbringen einer einachsigen Druckbelastung kam es bei einigen Betonen zum explosiven Abplatzen. Da ein Abplatzen bei den „PTM“-Versuchen in bisherigen Veröffentlichungen nicht auftrat (vgl. Tabelle 2), kann gefolgert werden, dass die Druckbelastung einen entscheidenden Einfluss auf das Auftreten explosiven Abplatzens hat. Tabelle 3 zeigt den Zeitpunkt des Abplatzens sowie die Masse des jeweils abgeplatzten Betons und den Anteil der betroffenen Betonoberfläche.

Wie aus [9] und anderen Quellen bekannt ist, ist das Risiko des explosiven Abplatzens bei hochfesten Betonen im Allgemeinen größer als bei normalfesten Betonen. Das Abplatzen bei den Betonen FB 32 und FB 33 bestätigt diese Erfahrungen. Wie Tabelle 3 zeigt, kam es aber auch bei zwei normalfesten Betonen mit Portlandflugaschезement und drei Betonen mit Hochofenzement zum explosiven Abplatzen. Bei den hochfesten Betonen mit CEM II/B-V und CEM III/A (FB 34 und FB 35), die vor dem Abplatzversuch einer besonders intensiven Trocknung unterzogen worden waren, kam es hingegen nicht zum Abplatzen.

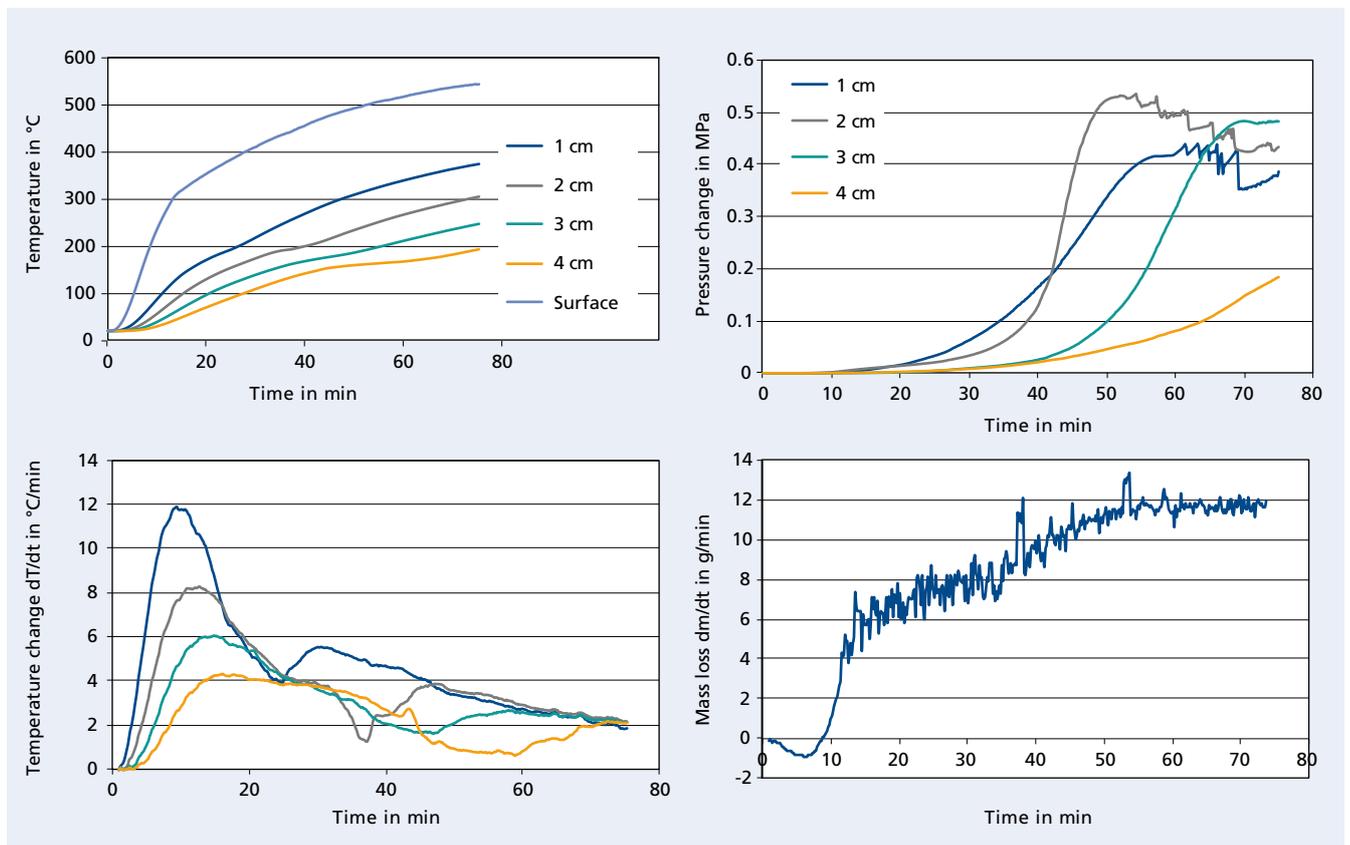
concrete, which is associated with a reduction in pore pressure. This assumption is reinforced by the observation of liquid water dripping from the underside of the test specimens during the test. This first occurred at the temperature and pressure sensor locations, starting with the sensors at a depth of 1 cm, then at 2 cm, 3 cm after a time delay, and finally at the sensors at a depth of 4 cm. More or less at the same time as water became visible at the sensors at a depth of 1 cm from the surface, liquid water was also seen to emerge between the steel sections and the sides of the test specimens perpendicular to the direction of the compressive load (Fig. 5). By contrast, no water dripped off on the sides of the test specimen in parallel with the loading direction.

An explanation for this observation can be seen in Fig. 6. The water which can be seen on the underside is probably water vapour diffusing inwards from the side of the heated surface of the test specimen. This condenses in the areas which are still cooler and then emerges at cracks on the side surfaces of the concrete. As explained previously, the compressive force prevents the occurrence of cracks in the plane perpendicular to the loading direction. This explanation was supported by tests performed without one-sided compressive load (see Section 3.5).

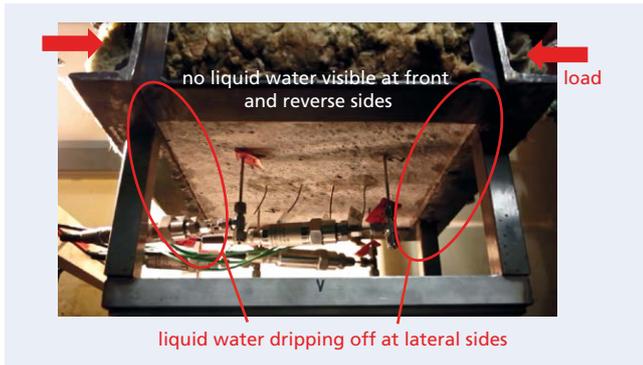
**3.3 Occurrence of explosive spalling in “PTM test”**

Explosive spalling occurred in some concretes on applying a single-axis compressive load. As no spalling was observed in the „PTM“ tests described in earlier publications (c.f. Table 2), it can be concluded that the compressive load has a crucial influence on the occurrence of explosive spalling. Table 3 shows the time of spalling, the mass of the spalled concrete in each case and the proportion of the concrete surface affected.

As is known from [9] and other sources, the risk of explosive spalling is generally greater for high-strength concretes than for normal-strength concretes. The spalling of the concretes FB 32

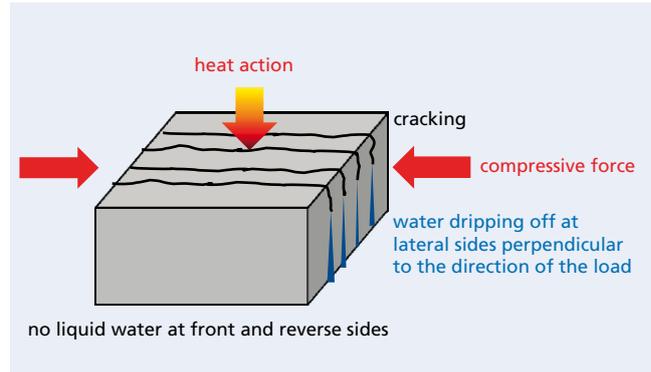


**Bild 4: Ergebnisse eines typischen PTM-Versuchs, bei dem kein Abplatzen auftrat (Maximaltemperatur 750 °C)**  
**Figure 4: Results of a typical PTM test in which no spalling occurred (maximum temperature 750 °C)**



**Bild 5:** Austritt von Wasserdampf und flüssigem Wasser an der Unterseite der Probekörper

**Figure 5:** Discharge of water vapour and liquid water at the underside of the test piece



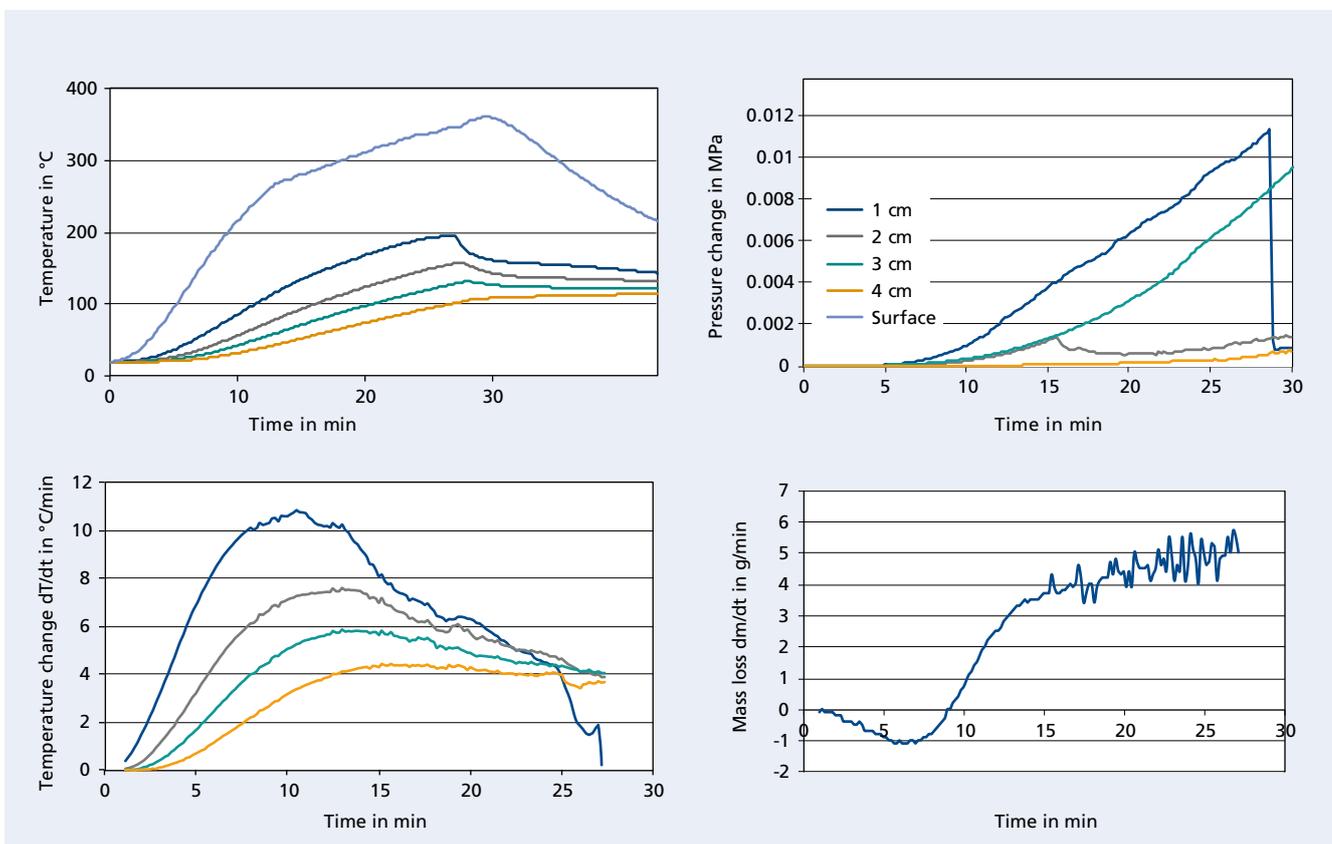
**Bild 6:** Erklärung für den beobachteten Wasseraustritt

**Figure 6:** Explanation of the observed water discharge

In Bild 7 ist ein typischer Verlauf der Entwicklung von Masse, Temperatur und Druck für den Fall, dass explosives Abplatzen im PTM-Versuch auftrat, dargestellt. Das Abplatzen trat in den sieben Fällen zwischen der 24. und der 34. Minute nach Versuchsbeginn mit lautem Knall auf. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Beton 1 cm von der erhitzten Oberfläche entfernt eine Temperatur von ca. 200 °C erreicht. Bemerkenswert ist, dass die gemessenen Porendrücke zum Zeitpunkt des Abplatzens sehr gering waren und in keinem Fall einen Wert von 0,1 MPa überschritten. Damit waren sie weit geringer als die maximalen Porendrücke der Probekörper im Versuchsprogramm, bei denen kein Abplatzen auftrat und insbesondere auch deutlich geringer als die Werte von bis zu ca. 4 MPa, die von anderen Wissenschaftlern gemessen wurden, die kein Abplatzen feststellten. Es kann daher gefolgert werden,

and FB 33 confirms these empirical findings. As Table 3 shows, explosive spalling did however also occur in two normal-strength concretes with Portland fly ash cement and three concretes with blast furnace cement. By contrast, spalling was not encountered in the high-strength concretes with CEM II/B-V and CEM III/A (FB 34 and FB 35), which had been subjected to particularly intensive drying prior to the spalling test.

Fig. 7 shows a typical mass, temperature and pressure development profile for cases with occurrence of spalling in a PTM test. In the seven cases, spalling occurred between 24 and 34 minutes after the start of the test, accompanied by a loud bang. At this point in time, the concrete had attained a temperature of approx. 200 °C at a distance of 1 cm from the heated surface. An interesting aspect is that the measured pore pressures at the time of spalling were



**Bild 7:** Ergebnisse eines typischen PTM-Versuchs, bei dem Abplatzen auftrat (hier: FB 6) Abplatzen und Versuchsabbruch nach ca. 27 min

**Figure 7:** Results of a typical PTM test in which spalling occurred (here: FB 6). Spalling and termination of the test occurred here after about 27 min



**Bild 8:** Oberfläche des Probekörpers FB 6 nach dem Abplatzen  
*Figure 8:* Surface of the FB 6 specimen after spalling

dass der Porendruck nicht der hauptverantwortliche Faktor für das Auftreten von explosivem Abplatzen sein kann. Ähnliche Schlussfolgerungen ziehen [10] und [11]. Ein Zusammenhang zwischen einem hohem Feuchtegehalt im Beton und einem höheren Abplatzrisiko kann somit nicht ausschließlich mit einem Anstieg des Porendrucks begründet werden.

Bild 8 zeigt die Oberfläche eines Probekörpers (hier FB 6) nach dem Abplatzversuch. Der Metallgitterschutz der Heizstrahler, der sich nur wenige Zentimeter über der Betonoberfläche befand, verhinderte, dass die Bruchstücke beim Abplatzen durch die freigesetzte Energie weit fortgeschleudert wurden.

Bei näherer Betrachtung der Bruchstücke konnte festgestellt werden, dass ein großer Anteil der Gesteinskörnung sauber aus dem Beton herausgelöst worden war. Die Gesteinskörnungen waren fast komplett frei von Anhaftungen aus Zementstein (Bild 9). Diese Beobachtung konnte bei allen Betonen gemacht werden, bei denen Abplatzen auftrat. Es kann daher vermutet werden, dass der Verbund zwischen Gesteinskörnung und Zementstein durch Vorgänge im Bereich der Kontaktzone („interfacial transition zone“, ITZ) beim PTM-Versuch beeinflusst wurde. Hierfür dürfte zumindest mitverantwortlich sein, dass sich unter Temperatureinfluss die Gesteinskörnung ausdehnt, während der Zementstein bei Temperaturen von  $> 100\text{ °C}$  schwindet. Wie z.B. in [12] gezeigt wurde, führt bei Betonen mit CEM I- und CEM II/A-LL-Zementen eine Anlagerung von Portlandit an der Oberfläche der Gesteinskörnung zu einer Zone höherer Porosität im Zementstein, während bei Betonen mit CEM III/A weniger Portlandit an der Oberfläche der Gesteinskörnung vorliegt. Dies führt dazu, dass bei Betonen mit CEM III/A in der Kontaktzone eine geringere Porosität vorliegt als bei den Betonen zum Beispiel mit CEM I. Das Abplatzen könnte bei den betroffenen Betonen dadurch begünstigt worden sein, dass infolge der Temperaturexpansion der Gesteinskörnung bei einer weniger porösen Kontaktzone (ITZ) größere Zugspannungen im Zementstein resultieren als bei den Vergleichsbetonen.

### 3.4 Versuche mit reduzierter Maximaltemperatur/Aufheizrate

Wie Mindeguia [13] zeigte, führt eine höhere Maximaltemperatur der Heizstrahler und eine damit verbundene höhere Aufheizrate der Probekörper zu geringeren Porendrücken im Beton. Mindeguia vermutet, dass dies damit begründet werden kann, dass bei der höheren Aufheizrate vermehrt Risse im Beton auftreten, die den Transport von flüssigem und dampfförmigem Wasser vereinfachen.

Zwei der im VDZ durchgeführten PTM-Versuche (Beton FB 3 und FB 11) wurden mit einer reduzierten Maximaltemperatur der Heizstrahler von  $600\text{ °C}$  (statt  $750\text{ °C}$  wie bei den anderen Versuchen) und einer damit verbundenen geringeren Aufheizrate der Probekörper durchgeführt. Es bestätigte sich, dass der gemessene Porendruck bei diesen beiden Versuchen höher war als bei den Versuchen mit höherer Maximaltemperatur



**Bild 9:** Abgeplatzte Betonbruchstücke (FB 6); Gesteinskörnung frei von Zementstein (links)

*Figure 9:* Spalled concrete fragments (FB 6); aggregate free from hardened cement paste (left)

very low and never exceeded a value of  $0.1\text{ MPa}$ . They were thus well below the maximum pore pressures of the test specimens in the experimental programme in which no spalling occurred and in particular also far lower than the values of up to approx.  $4\text{ MPa}$  measured by other scientists who did not observe any spalling. It can thus be concluded that the pore pressure cannot be the main factor responsible for the occurrence of explosive spalling. Similar conclusions are drawn by [10] and [11]. A relationship between a high moisture content of the concrete and a higher risk of spalling can therefore not be entirely explained by a rise in pore pressure.

Fig. 8 shows the surface of a test specimen (here FB 6) after the spalling test. The metal grille of the radiant heaters positioned just a few centimetres above the surface of the concrete stopped fragments being catapulted over a considerable distance by the energy liberated on spalling.

Closer inspection of the fragments revealed that a large proportion of the aggregate had been cleanly detached from the concrete. There was virtually no hardened cement paste attached to the aggregates (Fig. 9). The same was observed for all concretes in which spalling occurred. It can thus be assumed that the bond between the aggregate and the hardened cement paste was influenced by processes in the area of the contact zone („interfacial transition zone“, ITZ) in the PTM test. The fact that the aggregate expands under the influence of temperature, whereas the hardened cement paste shrinks at temperatures  $> 100\text{ °C}$ , is likely to be at least a contributory factor. As shown in [12], for example, an accumulation of Portlandite on the surface of the aggregate results, for concretes with CEM I and CEM II/A-LL cements, in a zone of greater porosity in the hardened cement paste, whereas less Portlandite is found on the surface of the aggregate in concretes with CEM III/A. Consequently, the porosity in the contact zone is lower for concretes with CEM III/A than for concretes with CEM I for example. In the case of the concretes affected, spalling may have been promoted by the fact that the thermal expansion of the aggregate resulted in greater tensile stress in the hardened cement paste with a less porous contact zone (ITZ) than in the other concretes.

### 3.4 Tests with reduced maximum temperature/heating rate

As shown by Mindeguia [13], a higher radiant heater maximum temperature and the associated higher test specimen heating rate result in lower pore pressures in the concrete. Mindeguia assumes that this can be explained by the fact that a higher heating rate causes more cracks to form in the concrete and these facilitate the transport of liquid water and vapour.

Two of the PTM tests conducted at VDZ (concretes FB 3 and FB 11) were performed with a reduced radiant heater maximum temperature of  $600\text{ °C}$  (instead of  $750\text{ °C}$  as in the other tests) and an associated lower test specimen heating rate. It could be confirmed that the pore pressure measured in these two tests was higher than in the tests with higher maximum temperature (max-

(Maximum bis ca. 1,4 MPa). Das Maximum des Porendrucks stellte sich zudem deutlich später ein. Bei den Versuchen mit einer Maximaltemperatur der Heizstrahler von 600 °C wurde auf der Unterseite der Probekörper nur ein sehr geringer Austritt von flüssigem Wasser beobachtet. Dies bestätigt, dass die Aufheizrate einen unmittelbaren Einfluss auf das Auftreten von Rissen im Beton hat und eine geringere Aufheizrate zu weniger Rissbildung führt. Dies kann v.a. mit einem verringerten Temperaturgradienten im Probekörper bei geringerer Aufheizrate (Temperaturdifferenz zwischen 4 cm und 1 cm Tiefe nach 60 min ca. 70 °C, ansonsten zu diesem Zeitpunkt ca. 140 °C) begründet werden.

### 3.5 Versuche ohne einseitige Druckbelastung

Um den in Bild 6 dargestellten Einfluss der Drucklast auf die Rissbildung zu verifizieren, wurde bei zwei PTM-Versuchen auf das Aufbringen einer einseitigen Drucklast verzichtet. Dies wurde durch das Einlegen von Zwischenblechen in den Stahlrahmen erreicht, die den Längenunterschied zwischen Probekörper und den seitlichen Stahlprofilen ausglich und so dafür sorgten, dass durch die Verschraubung die seitlichen Stahlprofile kraftschlüssig miteinander verbunden wurden. Vom Stahlrahmen auf die Seitenflächen der Betonprobekörper wirkten somit vorwiegend Reibungskräfte (Beton FB 23, FB 8).

Als wesentlicher Unterschied zu den Versuchen mit einseitiger Druckbelastung zeigte sich, dass es auf der Probenunterseite an allen vier Seitenflächen zum Abtropfen flüssigen Wassers kam. Hierdurch kann belegt werden, dass durch die Druckspannungen Risse senkrecht zur Druckrichtung verhindert werden.

## 4 Zusammenfassung und Diskussion der Versuche zum explosiven Abplatzen

Ein von Kalifa in [7] vorgestellter Versuchsaufbau (PTM-Versuch) wurde modifiziert, indem eine seitliche Druckbelastung auf den Betonprobekörper aufgebracht wurde. Die anhand von Versuchen mit diesem Versuchsaufbau gewonnenen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Während in PTM-Versuchen ohne Druckbelastung in der Literatur auch bei sehr dichten und hochfesten Betonen mit gleicher Probekörpergeometrie kein Abplatzen beobachtet wurde, trat im vorliegenden Forschungsvorhaben mit Druckbelastung bei 7 von 33 Betonen explosives Abplatzen auf. Hieraus kann gefolgert werden, dass die Druckspannungen entscheidend für das Auftreten von Abplatzen im PTM-Versuch sind.
- Das Abplatzen trat bei sehr geringen Porendrücken von weniger als 0,1 MPa auf. In den PTM-Versuchen des VDZ ohne Abplatzen betrug die Porendrücke bis ca. 1,4 MPa, während in PTM-Versuchen anderer Wissenschaftler ohne Abplatzen Porendrücke bis ca. 4 MPa gemessen wurden. Es wird daher davon ausgegangen, dass hohe Porendrücke nicht die Hauptursache des Auftretens von explosivem Abplatzen von Beton sind. Diese Vermutung wird noch dadurch bestärkt, dass in Versuchen im VDZ die O<sub>2</sub>-Durchlässigkeit nach DAfStb Heft 422 [14] der im PTM-Versuch vom Abplatzen betroffenen Betone nach dem Erhitzen von 105 °C auf 300 °C gegenüber Vergleichsbetonen überproportional anstieg und sich ein hoher Permeabilitätskoeffizient und ein hoher Porendruck im Beton gegenseitig ausschließen sollten. Eine überproportional ansteigende Permeabilität könnte ein Hinweis auf die im Vergleich zu anderen Betonen deutlicheren Gefügeveränderungen im Zementstein beim Erhitzen von 105 °C bis 300 °C sein.
- Abplatzen trat bei hochfesten Betonen sowie bei normalfesten Betonen mit Hochofenzement (CEM III/A) und Portlandflugaschezement (CEM II/B-V) auf. Im Vergleich zu anderen Betonen im Versuchsprogramm
  - weist der Zementstein dieser Betone einen geringeren Kapillarporenanteil und einen größeren Gelporenanteil auf,
  - enthält der Zementstein dieser Betone einen geringeren Anteil an Calciumhydroxid. Bei Annahme einer vollständigen Hydratation entspricht dies einem größeren Anteil an C-S-H-Phasen.

imum up to approx. 1.4 MPa). The pore pressure also reached its maximum at a much later point in time. Very little liquid water was seen to emerge on the underside of the test specimens in the tests with a radiant heater maximum temperature of 600 °C. This confirms that the heating rate has a direct influence on the occurrence of cracks in the concrete and a lower heating rate leads to less crack formation. This can primarily be explained by a reduced temperature gradient in the test specimen with a lower heating rate (temperature difference between a depth of 4 cm and 1 cm after 60 min. approx. 70 °C, otherwise approx. 140 °C at this point in time).

### 3.5 Tests without one-sided compressive load

To verify the effect on crack formation of the compressive load as shown in Fig. 6, two PTM tests were conducted without one-sided compressive load application. This was done by inserting intermediate plates into the steel frame to compensate for the difference in length between the test specimen and the side steel sections and so to ensure that the bolted joint produced a frictional connection between the side steel sections. Mainly frictional forces were thus exerted by the steel frame on the side surfaces of the concrete test specimens (concretes FB 23, FB 8).

A significant difference in relation to the tests with one-sided compressive load was that liquid water dripped off the underside of the specimen at all four side surfaces. This can be seen as proof that the compressive stress prevents cracking perpendicular to the direction of pressure.

## 4 Summary and discussion of the trials on explosive spalling

A test setup (PTM test) presented by Kalifa in [7] was modified by applying a lateral compressive load to the concrete specimen. The results of the tests with this experimental setup can be summarized as follows:

- While in PTM tests without compressive stress in literature no spalling was observed even with very dense and high-strength concretes with the same test specimen geometry, in the present research project 7 of 33 concretes showed explosive spalling. From this it can be concluded that the application of compressive forces is a decisive factor for the occurrence of spalling in the PTM test.
- Spalling occurred at very low pore pressures of less than 0.1 MPa. In the VDZ's PTM experiments without spalling, the pore pressures were up to approx. 1.4 MPa, while in PTM tests carried out by other scientists, in which no spalling occurred, higher pore pressures up to approx. 4 MPa were measured. It is therefore concluded that high pore pressures are not the main cause for explosive spalling of concrete. This conclusion is further reinforced by the fact that – compared to the concretes that did not spall – the O<sub>2</sub>-permeability [14] of the concretes that spalled in the PTM test carried out at the VDZ increased disproportionately higher after heating them from 105 °C to 300 °C. A disproportionately high permeability could be an indication of more pronounced structural changes in the hardened cement paste compared to other concretes when heating from 105 °C to 300 °C.
- Spalling occurred in high-strength concretes as well as in normal strength concretes with blastfurnace cement (CEM III/A) and Portland fly ash cement (CEM II/B-V). Compared to other concretes in the test program
  - the hardened cement paste of these concretes has a lower capillary porosity and a higher percentage of gel pores,
  - the hardened cement paste of these concretes contains a lower proportion of calcium hydroxide. Assuming complete hydration, this corresponds to a greater proportion of C-S-H phases.

■ Da hohe Porendrücke als Hauptursache des Abplatzens bei den durchgeführten Versuchen ausgeschlossen werden, erscheinen folgende Hypothesen zu der Frage begründet, warum Abplatzen bei einigen Betonen unter Druckbelastung auftrat, während andere Betone kein Abplatzen zeigten:

- 1) Bedingt durch die Porenverteilung der betroffenen Betone
  - trockneten diese Betone nach Umlagerung von 100 % RH in 65 % RH langsamer,
  - wiesen diese Betone bei „üblichen“ relativen Luftfeuchten (50 % RH bis 80 % RH) höhere Ausgleichsfeuchten (in M.-%) auf als die anderer Betone im Versuchsprogramm.

Hierdurch lag ihr massenbezogener Feuchtegehalt beim Abplatzversuch nach ähnlicher Trocknungsdauer höher. Eine negative Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des Betons durch einen höheren Feuchtegehalt beim Erhitzen könnte zum Abplatzen beitragen, wie z.B. [8] vermutet.

- 2) Ein Abplatzen könnte dadurch begünstigt werden, dass bei den betroffenen Betonen der Temperaturexpansion der Gesteinskörnung durch eine wenig poröse Kontaktzone (ITZ) ein größerer Widerstand entgegengesetzt wurde und hieraus größere Zugspannungen im Zementstein resultierten.
- 3) Im Temperaturbereich von 150 °C bis ca. 400 °C findet eine teilweise Freisetzung des Wassers der Calciumsilikathydrate (C-S-H) im Zementstein statt, während es erst bei Temperaturen von mehr als ca. 500 °C zu einer chemischen Umwandlung von Calciumhydroxid kommt. Vermutlich treten bei Betonen mit Silicastaub, Hochofenzement oder Portlandflugaschезement aufgrund des unterschiedlichen Anteils der Hydrationsprodukte beim Erhitzen auf Temperaturen bis ca. 400 °C größere Gefügeänderungen im Vergleich zu anderen Betonen ohne diese Zementhauptbestandteile bzw. Zusatzstoffe auf, die – insbesondere unter Druckbelastung – unterschiedliche Dehnungen in verschiedenen Abständen von der erhitzten Oberfläche nach sich ziehen können. Diese Dehnungsunterschiede dürften einen Beitrag zum Abplatzen leisten.

Diese Hypothesen und der relative Beitrag der vermuteten Phänomene zum Abplatzen sollen in einem Nachfolgevorhaben untersucht werden.

■ Since high pore pressures are excluded as the main cause of spalling during the tests carried out, the following hypotheses on the question as to why spalling occurred in some concretes under pressure load, while other concretes showed no spalling:

- 1) Due to the pore distribution of the affected concretes
  - after relocation of 100 % RH to 65 % RH, these concretes dried more slowly,
  - these concretes exhibited higher equilibrium moisture content (in mass %) at “normal” relative humidity levels (50 % RH to 80 % RH) than other concretes in the experimental program. As a result, their mass related moisture content was higher during the spalling test after a similar drying period.

A negative influence of a higher moisture content during heating on the mechanical properties of the concrete could contribute to spalling, such as assumed in [8].

- 2) Due to a less porous interfacial transition zone (ITZ), the thermal expansion of the aggregates generated comparatively higher tensile stresses in the hardened cement paste.
- 3) In the temperature range from 150 °C to approx. 400 °C, the water of the calcium silicate hydrates (C-S-H) is partially released from the hardened cement paste, whereas a chemical transformation of calcium hydroxide only takes place at temperatures above approx. 500 °C. In concretes with silica fume, blastfurnace cement or Portland fly ash cement, due to the different relative proportion of hydration products, there are probably more pronounced changes in the microstructure when heated to temperatures of up to approx. 400 °C compared to other concretes without these main cement components or additions, which – particularly under compression – cause different elongations at different distances from the heated surface. These differences in strain are likely to contribute to spalling.

These hypotheses and the relative contribution of the presumed phenomena to spalling will be investigated in a follow-up project.

## Literatur / Literature

- [1] DIN EN 12390-2:2009 „Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen“
- [2] www.wulfi.de
- [3] DIN EN ISO 15148:2013 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften“
- [4] DIN EN ISO 12572:2001 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit“
- [5] DIN EN ISO 12571:2003 „Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten“
- [6] DIN EN 1992-1-2:2010-12 „Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall“
- [7] Kalifa, P. et al.: Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. Cement and Concrete Research 30 (2000), pp. 1915–1927
- [8] Jansson, R.: The Influence of Pressure in the Pore System on Fire Spalling of Concrete. Stockholm, 2010
- [9] Fire design of concrete structures. State of the art report, fib 2007
- [10] Jansson, R.: Fire Spalling of Concrete, Theoretical and Experimental Studies. Stockholm, 2013
- [11] Mindeguia, J.-C. et al.: Experimental analysis of concrete spalling due to fire exposure. European Journal of Environmental and Civil Engineering 17 (2013)
- [12] Leemann, A. et al.: Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete. Cement & Concrete Composites 32 (2010)
- [13] Mindeguia, J.-C. et al.: Experimental discussion on the mechanisms behind the fire spalling of concrete. Fire and Materials 2014
- [14] Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 422, Berlin 1991
- [15] Kalifa, P. et al.: High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure. Cement and Concrete Research 31 (2001), pp. 1487–1499
- [16] Mindeguia, J.-C. et al.: Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature – Experimental and numerical discussion on spalling risk. Cement and Concrete Research (2009)
- [17] Jihad, Miah. et al.: Fire spalling of concrete: effect of cement type. 4th International workshop on concrete spalling due to fire exposure (2015)
- [18] Mugume, R. et al.: Effect of heating rate on pore pressure spalling of fibre-reinforced high strength concrete subjected to high temperatures. 1st International RILEM workshop on concrete spalling due to fire exposure (2009)
- [19] Mugume, R. et al.: Effect of the measurement technique on the amount of maximum pore pressures measured inside concrete subjected to high temperatures. 2nd international RILEM workshop on spalling due to fire exposure (2011)
- [20] Suhaendi, S. L.: Effect of polypropylene fibre geometry on explosive spalling mitigation in high strength concrete under elevated temperature condition. International Congress, Concrete Technology Unit of the University of Dundee, Dundee 2008, pp. 149–156