

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 1

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 1

29

Übersicht

Bei der Planung von Bauteilen aus Beton und bei der Anwendung von Zementestrichen kommt es zu zwei Fragestellungen, die es erforderlich machten, im einem Forschungsvorhaben die Feuchte-speicherung und den Feuchtetransport in zementgebundenen Baustoffen genauer zu untersuchen:

- Berichte aus der Praxis über ein vermeintlich verzögertes Trocknungsverhalten von Estrichen, die mit Portlandkomposit-(CEM II) oder Hochofenzementen (CEM III) hergestellt wurden im Vergleich zu Estrichen mit Portlandzementen (CEM I). Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich des Trocknungsverhaltens verzichten Estrichleger aktuell häufig auf die Anwendung von CEM II und CEM III-Zementen.
- Der Nachweis der Vermeidung explosiver Abplatzungen bei Betonbauteilen im Brandfall rückt durch die Verwendung von Rechenverfahren zur Tragwerksbemessung [1] stärker in den Fokus.

Die Untersuchungen zum Trocknungsverhalten von Estrichen werden im Teil 1 dieses Berichts vorgestellt. Die Vorgabe eines maximalen Feuchtegehalts (ausgedrückt in CM-%, siehe Carbide-Methode) zur Definition der Belegreife von Estrichen ist heute gängige Praxis. Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass diese Vorgabe nicht in allen Fällen die Zementart, die Porenverteilung im Zementstein und das hieraus resultierende Austrocknungsverhalten von Zementestrichen richtig bewertet.

In Teil 2 des Berichts werden die Ergebnisse von rechnergestützten Simulationen zur Feuchteverteilung in Betonbauteilen verschiedener Zusammensetzung unter üblichen Umgebungsbedingungen zusammengefasst. Des Weiteren beschreibt Teil 2 Versuche zum explosiven Abplatzen von Beton und die dabei erzielten Ergebnisse.

1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Trocknungsverhalten von Zementestrich

Die „Belegreife“ eines Estrichs für Bodenbeläge liegt vor, wenn der Estrich nach seinem Einbringen soweit getrocknet ist, dass der maximale Feuchtegehalt erreicht oder unterschritten wird, der vor Verlegung eines bestimmten Bodenbelags vorhanden sein darf. Wird ein Bodenbelag aufgebracht, bevor die Belegreife erreicht ist, muss mit Schäden am Bodenbelag bzw. am Estrich gerechnet werden. Die auf Baustellen am weitesten verbreitete Methode zur Ermittlung des Feuchtigkeitsgehalts von Estrichen ist die Carbide-Methode (oder „CM-Methode“). Ihre Anwendung ist mit Neu-

Abstract

In the design of structural concrete elements and the use of cement screeds there are two issues that made it necessary to investigate the storage and transport of moisture in cement-bonded building materials more closely in a research project:

- Reports from practical usage about a supposedly delayed drying behaviour of screeds that have been made with Portland-composite (CEM II) or blastfurnace (CEM III) cements when compared with screeds made with Portland cements (CEM I). At present screed-laying personnel often rule out the use of CEM II and CEM III cements because of the existing uncertainties with regard to their drying behaviour.
- Greater emphasis is being placed on verification of the avoidance of explosive spalling of structural concrete members in the case of fire through the use of calculation methods for designing load-bearing structures [1].

The investigations into the drying behaviour of screeds are presented in Part 1 of this report. The stipulation of a maximum moisture content (expressed in CM %, see Carbide Method) for defining the readiness of a screed for laying floor coverings is now established practice. The results of the project show that this stipulation does not evaluate the cement type, the pore distribution in the hardened cement paste and the resulting drying behaviour of cement screeds correctly in all cases.

The results of computer-aided simulations of the moisture distribution in concrete structural elements with differing compositions under normal ambient conditions are summarized in Part 2 of this report. Part 2 also describes the testing of explosive spalling of concrete and the results obtained.

1 Introduction and approach

1.1 Drying behaviour of cement screed

A screed is deemed to be ready for laying floor coverings when, following its placement, it has dried to such an extent that the moisture content is at or below the maximum level which is permissible for laying a particular floor covering.

If a floor covering is laid before the screed is ready, damage to the floor covering or screed is to be expected. The most commonly used method of determining the moisture content of screeds on construction sites is the calcium carbide method (or „CM method“). Use of this method is stipulated in the revision to the standard DIN 18560-1 [2] for assessment of the readiness of cement screeds for laying floor coverings.

fassung der DIN 18560-1 [2] zur Beurteilung der Belegreife von Zementestrichen normativ vorgegeben.

Im Sinne eines zügigen Baufortschritts haben Bauherren und bauausführende Firmen ein Interesse daran, dass Estriche möglichst bald nach ihrer Verlegung soweit getrocknet sind, dass ihre Belegreife erreicht ist. Aus der Praxis wurde in der Vergangenheit immer wieder berichtet, dass sich das Trocknungsverhalten von Estrichen mit CEM II-Zementen (Portlandkompositzementen) und CEM III-Zementen (Hochofenzementen) von dem Trocknungsverhalten von Estrichen mit Portlandzementen dahingehend unterscheidet, dass die Trocknung bis zur Belegreife in manchen Fällen länger dauere. Der Einfluss der Zementart auf das Trocknungsverhalten von zementgebundenen Estrichen wurde daher noch einmal systematisch untersucht. Insbesondere sollte festgestellt werden, ob die Verwendung von CEM II- und CEM III-Zementen tatsächlich das Trocknungsverhalten von Zementestrichen beeinflusst und – falls sich dies bestätigt – hierfür Gründe genannt und Hinweise zum Umgang mit diesem Verhalten gegeben werden können.

1.2 Abplatzungen bei Betonbauteilen unter Brandbeanspruchung

Werden Betonbauteile im Brandfall hohen Temperaturen ausgesetzt, kann es zum Abplatzen von Betonstücken kommen. Besondere Bedeutung haben hierbei die so genannten explosiven Abplatzungen, bei denen sich Betonstücke schlagartig von den betroffenen Bauteilen lösen und mit lauten, explosionsartigen Geräuschen fortgeschleudert werden. Das Abplatzen von größeren Betonstücken kann durch die Verminderung der Querschnitte und den Verlust der Betonüberdeckung über der Bewehrung zu einem verfrühten Versagen der betroffenen Bauteile führen. Wenn explosive Betonabplatzungen auftreten, geschieht dies meist bereits in den ersten 30 Minuten eines Brands bei Temperaturen zwischen 100 °C und 300 °C [3].

Als Ursache für das Auftreten von explosiven Betonabplatzungen unter Brandbeanspruchung werden in der Literatur von einer Vielzahl von Autoren gemeinhin zwei verschiedene Mechanismen genannt (z.B. [3]):

- Das Erhitzen von Beton und die damit verbundenen Temperaturgradienten führen zu Spannungen im Bauteil. Des Weiteren kann es beim Erhitzen zu Unterschieden zwischen den thermischen Dehnungen des Zementsteins und der Gesteinskörnung sowie zu einer Beeinträchtigung des Zementsteins aufgrund seiner Dehydratation kommen.
- Im Beton enthaltene Feuchtigkeit verdampft unter Temperatureinfluss nach außen und tritt dort aus dem Beton aus. Gleichzeitig diffundiert sie auch nach innen, wo sie in den noch kühleren Bereichen kondensiert. Es entsteht auf diese Weise ein Bereich wassergesättigter Poren („moisture clog“), der nun eine Sperrschicht für den nachfolgenden Wasserdampf bildet. Durch die Behinderung der Bewegung von freiem Wasser, Wasserdampf und trockener Luft kommt es zu einem Anstieg des Porendrucks im Beton.

Zur Frage des relativen Einflusses der genannten Prozesse auf das explosive Abplatzen von Beton besteht derzeit keine Einigkeit unter den auf diesem Gebiet tätigen Wissenschaftlern/Experten.

Die Bemessung von Stahlbetontragwerken für den Brandfall ist normativ in dem im Jahr 2010 veröffentlichten Eurocode 2, Teil 1–2 geregelt [1]. Die Norm erlaubt neben der traditionellen Heißbemessung über Tabellen auch die Verwendung von Rechenverfahren. Der Anwender hat damit die Möglichkeit, auf Grundlage der tatsächlich zu erwartenden Brandlasten die zeitabhängige Temperaturerhöhung in Stahlbetonquerschnitten und die damit verbundenen Änderungen der Materialeigenschaften rechnerisch abzuschätzen. Eine solche Bemessung kann zu wirtschaftlicheren Bauteilen als die Verwendung von Tabellen führen.

Laut Eurocode 2, Teil 1–2, sind explosive Betonabplatzungen unwahrscheinlich, wenn der Feuchtegehalt des Betons weniger als k M.-% beträgt. Bei über k M.-% des Betons sollte eine genauere Beurteilung der Art der Gesteinskörnung, der Durchlässigkeit und der Erwärmungsgeschwindigkeit in Betracht gezogen

In order to avoid holding up the progress of construction work, it is in the interests of clients and building companies for screeds to be dry enough and ready for laying floor coverings as quickly as possible after being applied. In the past, practical experience has sometimes indicated that the drying behaviour of screeds with CEM II cements (Portland composite cements) and CEM III cements (blast furnace cements) differs from that of screeds with Portland cements in that they sometimes take longer to dry until ready for laying floor coverings. The influence of the cement type on the drying behaviour of cement-bound screeds was therefore systematically investigated again. In particular the aim was to establish whether the use of CEM II and CEM III cements actually influences the drying behaviour of cement screeds and – if this were to be confirmed – to state the reasons for this, as well as to be able to give advice on how to deal with this behaviour.

1.2 Spalling on concrete components when exposed to fire

If concrete components are exposed to high temperatures in a fire, this can result in the spalling of fragments of concrete. Of particular significance is so-called explosive spalling, in which concrete fragments abruptly break away from the components concerned and fly off with a loud noise like an explosion. The spalling of large fragments of concrete can result in premature failure of the components concerned due to reduction of the cross-sections and a loss of concrete cover over the reinforcement. Explosive spalling tends to occur in the first 30 minutes of a fire at temperatures between 100 °C and 300 °C [3].

In various publications, authors have generally identified two different mechanisms as being responsible for the occurrence of explosive pop-outs on exposure to fire (e.g. [3]):

- The heating-up of concrete and the associated temperature gradients produce stresses in the component. In addition, heat generation can lead to differences between the thermal expansion of the hardened cement paste and of the aggregate, as well as to impairment of the hardened cement paste as a result of dehydration.
- Moisture contained in the concrete evaporates outwards under the influence of temperature and then emerges from the concrete. At the same time, it also diffuses inwards and condenses in the areas which are still cooler. This gives rise to a moisture clog which then acts as a barrier layer for the subsequent water vapour. Such obstruction of the movement of free water, water vapour and dry air causes an increase in pore pressure in the concrete.

There is at present no consensus among the scientists/experts working in this field as to the relative influence of the processes mentioned on the explosive spalling of concrete.

The fire design of reinforced concrete supporting structures is regulated in Eurocode 2, Parts 1–2, published in 2010 [1]. Alongside traditional fire design based on tables, the standard also permits the use of calculation methods. Users can accordingly perform calculations to estimate the time-dependent temperature increase in reinforced steel cross-sections and the associated changes in material properties on the basis of the fire loads actually to be expected. This design procedure can yield more economical components than if use is made of tables.

According to Eurocode 2, Parts 1–2, explosive spalling is unlikely if the moisture content of the concrete is less than k mass %. If the figure is above k mass %, a more accurate assessment of the type of aggregate, the permeability and the heating rate should be considered if calculation methods are employed for fire design purposes. According to the standard, there is only no need for further checking of normal-strength concrete if use is made of the tables given in the standard for the fire design of reinforced concrete components. A value of 3.0 mass % is recommended for k in the standard. The final decision on the value is however at the discretion of the member states, as it did not prove possible to reach a consensus at European level on account of differences in findings. There is no more detailed information on how the moisture content is defined. In Germany, $k = 4.0$ mass % was set down in the national annex,

Tabelle 1: Untersuchte Estrichzusammensetzungen mit Zementen des „Herstellers 1“
Table 1: Screed compositions investigated with cements from „Producer 1“

Cement type	CEM I 42,5 R	CEM III/A 42,5 N	CEM II/B-S 42,5 N	CEM II/A-LL 42,5 N	CEM II/B-V 42,5 R
Cement content 300 kg/m ³ , w/c = 0.65, Rhine sand/gravel B8	FE1	FE3	FE5	FE7	FE9
Cement content 330 kg/m ³ , w/c = 0.55, superplasticizer 1 mass % w.r.t. cement, Rhine sand/gravel B8	FE2	FE4	FE6	FE8	FE10

werden, wenn die Heißbemessung über Rechenverfahren erfolgt. Nur wenn die in der Norm angegebenen Tabellen zur Heißbemessung von Stahlbetonteilen verwendet werden, ist laut Norm für normalfesten Beton keine weitere Überprüfung notwendig. In der Norm wird für k ein Wert von 3,0 M.-% empfohlen. Die Entscheidung über die Höhe des Wertes wird aber letztlich den Mitgliedsstaaten überlassen, da aufgrund unterschiedlicher Erkenntnisse auf europäischer Ebene keine Einigung über diesen Wert erzielt werden konnte. Genauere Angaben dazu, wie der Feuchtegehalt definiert ist, fehlen. In Deutschland wurde im nationalen Anhang $k = 4,0$ M.-% festgelegt, die meisten nationalen Anhänge anderer europäischer Länder folgen der Empfehlung $k = 3,0$ M.-%.

Systematische Untersuchungen zum Einfluss der Betonzusammensetzung und der Umgebungsbedingungen auf den Feuchtegehalt und die Feuchteverteilung in Betonbauteilen lagen bislang nicht vor. Die Vorhersage des quantitativen Feuchtegehalts in Betonbauteilen war daher in der Regel nur sehr eingeschränkt möglich, da dieser in hohem Maße von der gewählten Betonrezeptur und den Umgebungsbedingungen abhängt.

Will man die Tragwerksplaner in die Lage versetzen, die modernen Rechenmethoden und ihre Potenziale zu nutzen, ist es erforderlich, zu untersuchen, welche Feuchtegehalte und -verteilungen bei Betonen verschiedener Zusammensetzungen bei üblichen Umweltbedingungen typischerweise vorliegen. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte gleichzeitig überprüft werden, welchen Einfluss die Betonzusammensetzung und der Feuchtegehalt des Betons auf das Auftreten von Abplatzen beim Erhitzen von Beton haben können.

2 Trocknungsverhalten von Zementestrich

2.1 Untersuchungen zum Trocknungsverhalten von Zementestrich

Zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Zementestrichen wurden Probekörper mit zwei Zusammensetzungen und jeweils fünf Zementarten – d.h. zehn Estrichrezepturen – herge-

whereas the national annexes of most other European countries follow the recommendation $k = 3.0$ mass %.

So far, no systematic studies have been presented on the influence of the concrete composition and the ambient conditions on moisture content and moisture distribution in concrete components. Predictions about the quantitative moisture content of concrete components have therefore generally only been possible to a very restricted extent, as this greatly depends on the concrete formulation selected and the ambient conditions.

In order to enable designers of loadbearing members to make use of modern calculation methods and the potential these offer, it is necessary to investigate the moisture content and moisture distribution typically found in concretes of different compositions under standard ambient conditions. A further objective of this research project was to examine the possible influence of the concrete composition and moisture content on the occurrence of spalling when concrete is heated.

2 Drying behaviour of cement screed

2.1 Investigations into the drying behaviour of cement screed

To study the drying behaviour of cement screeds, test specimens were produced with two compositions and five cement types in each case – i.e. ten screed formulations.

For this purpose, moulds were made from rigid foam panels and lined on the inside with diffusion-resistant adhesive tape. Five test specimens with a base area of 30 cm x 30 cm and a screed thickness of 6 cm as used in practice were produced from each of the compositions shown in Table 1 (Fig. 1). All five cements used for the screeds were provided by one producer („Producer 1“).

After being produced, the test specimens were stored for one day at 20 °C/100 % relative humidity and for three days at 20 °C/80 % relative humidity before being put into storage at 20 °C/65 % relative humidity four days following production. The specimens were

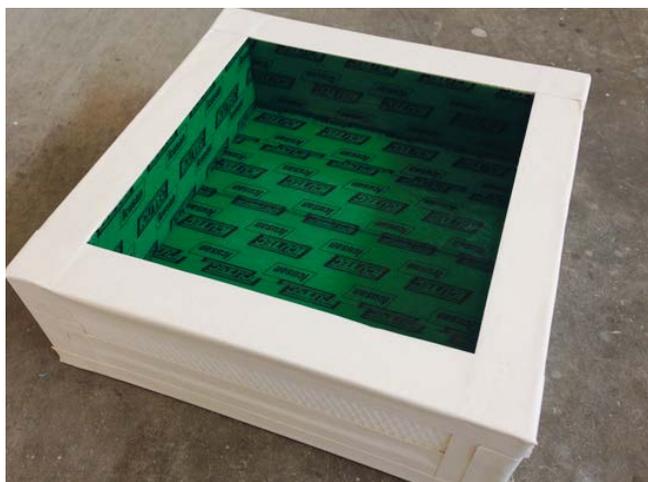


Bild 1: Probekörper 30 cm x 30 cm x 6 cm zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Zementestrich
Figure 1: 30 cm x 30 cm x 6 cm test pieces for investigating the drying behaviour of cement screed

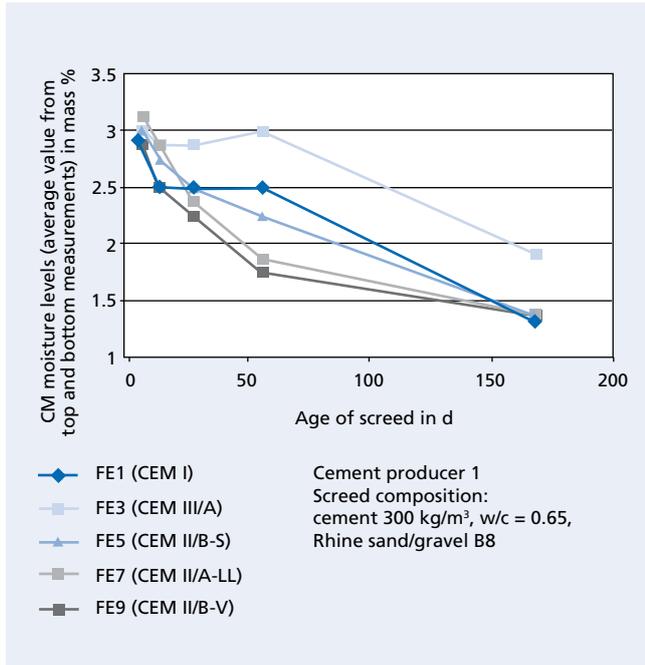


Bild 2: Ermittelte CM-Feuchten für Estriche mit einem Zementgehalt von 300 kg/m³ (w/z = 0,65)
Figure 2: Measured CM moisture levels for screeds with a cement content of 300 kg/m³ (w/c = 0.65)

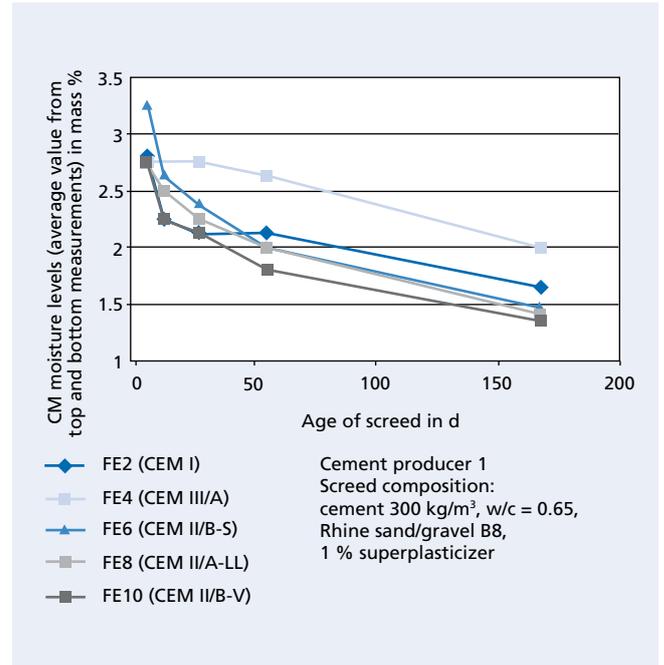


Bild 3: Ermittelte CM-Feuchten für Estriche mit einem Zementgehalt von 330 kg/m³ (w/z = 0,55)
Figure 3: Measured CM moisture levels for screeds with a cement content of 330 kg/m³ (w/c = 0.55)

stellt. Hierzu wurden Formen aus Hartschaumplatten vorbereitet, die an der Innenseite mit diffusionsdichtem Kleband ausgekleidet wurden. Von jeder der in Tabelle 1 dargestellten Zusammensetzungen wurden fünf Probekörper mit einer Grundfläche von 30 cm x 30 cm und einer praxisüblichen Estrichdicke von 6 cm hergestellt (Bild 1). Alle fünf für die Estriche verwendeten Zemente wurden von einem Hersteller („Hersteller 1“) bereitgestellt.

Die Probekörper wurden nach der Herstellung für einen Tag im Klima 20 °C/100 % r.F. und drei Tage im Klima 20 °C/80 % r.F.

left in the mould until the time of moisture measurement so that drying could only take place upwards – as is the case with areas of screed in practice.

The moisture of each of the screeds was measured 7, 14, 28, 56 and 168 days after their production to document the development of the drying process over time. The rigid foam mould was removed immediately prior to moisture measurement.

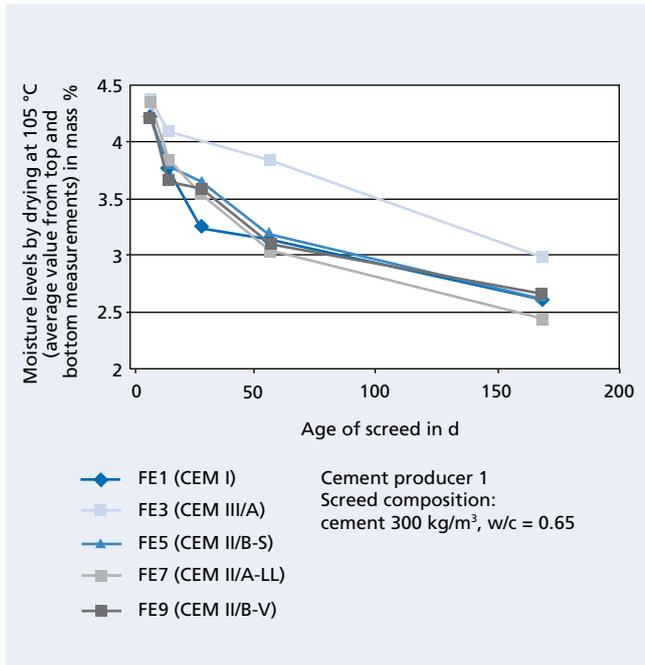


Bild 4: Mittels Ofentrocknung bei 105 °C ermittelte Feuchtegehalte für Estriche mit einem Zementgehalt von 300 kg/m³ (w/z = 0,65)
Figure 4: Moisture levels determined by oven drying at 105 °C for screeds with a cement content of 300 kg/m³ (w/c = 0.65)

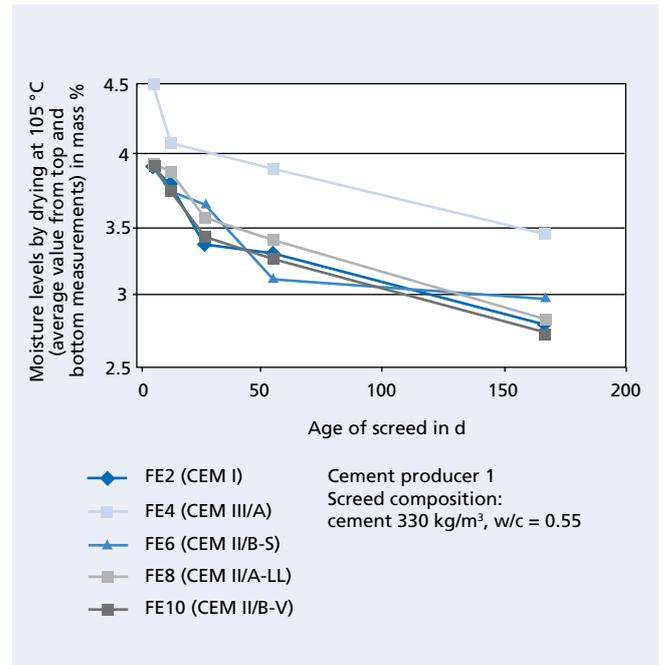


Bild 5: Mittels Ofentrocknung bei 105 °C ermittelte Feuchtegehalte für Estriche mit einem Zementgehalt von 330 kg/m³ (w/z = 0,55)
Figure 5: Moisture levels determined by oven drying at 105 °C for screeds with a cement content of 330 kg/m³ (w/c = 0.55)

gelagert, bevor sie vier Tage nach der Herstellung ins Klima 20 °C/65 % r.F. umgelagert wurden. Bis zur Feuchtemessung blieben die Proben in der Form, sodass ein Trocknen – wie bei Estrichflächen in der Praxis – nur nach oben stattfinden konnte.

Die Feuchtemessung der Estriche erfolgte jeweils 7, 14, 28, 56 und 168 Tage nach der Herstellung, um so die zeitliche Entwicklung des Trocknungsprozesses zu dokumentieren. Die Form aus Hartschaum wurde unmittelbar vor der Feuchtemessung entfernt. Diese erfolgte auf zwei Arten:

- CM-Messung an repräsentativen Teilproben, die mit einem Stemmerhammer von der oberen und der unteren Hälfte des Probekörpers gewonnen wurden.
- Darren durch Ofentrocknung bei 105 °C bis zur Massenkonstanz an repräsentativen Teilproben, die mit einem Stemmerhammer von der oberen und der unteren Hälfte des Probekörpers gewonnen wurden.

Die CM-Messung wurde wie in [4] beschrieben durchgeführt. Die Repräsentativität der Teilproben wurde dadurch gewährleistet, dass jeweils eine genügend große, sich nicht verjüngende Entnahmestelle angelegt wurde.

Die Bilder 2 bis 5 zeigen die mittels CM-Messung und Ofentrocknung ermittelten Feuchtegehalte für die Estriche gemäß Tabelle 1. Bei der Angabe der Feuchtegehalte aus CM-Messung und Ofentrocknung wurden die Feuchtegehalte von Ober- und Unterseite gemittelt. Die mittels CM-Messung ermittelten Feuchtegehalte sind geringer als die der Ofentrocknung. Dies deutet an, dass in der CM-Messung nicht das gesamte physikalisch gebundene Wasser erfasst wird. Im zeitlichen Verlauf der Feuchtegehalte der Estriche mit Portland- und Portlandkompositzementen war kein systematischer Unterschied erkennbar. Der Feuchtegehalt der Estriche mit Hochofenzement war in allen Fällen deutlich höher. Wie man erkennt, sind die Verläufe der durch die CM-Messung und das Darren ermittelten Feuchtegehalte nicht in allen Fällen stetig. Dies ist vermutlich insbesondere auf den Einfluss der Probengewinnung zurückzuführen.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse für Estriche mit Zementen des „Herstellers 1“ auf Zemente anderer Hersteller zu überprüfen, wurden die o.g. Versuche mit je einem Portland-, einem Portlandkalkstein- und einem Hochofenzement zwei weiterer Hersteller wiederholt. Die höheren Feuchtegehalte der Estriche mit Hochofenzement im Vergleich zu den Estrichen mit Portland- und Portlandkalksandzement konnten dabei bestätigt werden.

Das Trocknungsverhalten der Estriche mit Hochofenzement konnte bei den Zementen des „Herstellers 1“ über die Porengrößenverteilung der Estriche, die 28 Tage nach Herstellung mittels Quecksilberdruckporosimetrie ermittelt wurde (Bild 6), erklärt werden. Wie aus der Literatur bekannt (z.B. [5]), nimmt bei ansteigendem Anteil an Hüttensand und abnehmendem Anteil an Portlandzementklinker im Zement das Volumen der Gelporen zu, während der Anteil der Kapillarporen abnimmt. Für den Estrich mit CEM III/A des Herstellers 1 wird dies in Bild 6 bereits 28 Tage nach Herstellung deutlich, während sich der Verlauf der Porositätskurve beim Estrich mit CEM II/B-S zu diesem Zeitpunkt kaum von denen mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-V unterscheidet. Mit der Porengrößenverteilung im Zementstein mit CEM III/A sind zum einen positive Dauerhaftigkeitseigenschaften wie ein höherer Chlorideindringwiderstand oder ein erhöhter Widerstand gegen chemischen Angriff, z.B. durch kalklösende Kohlensäure oder biogene Schwefelsäure [6], aber auch die über einen längeren Zeitraum gemessenen höheren Feuchtegehalte verbunden (s. Abschnitt 2.3).

2.2 Untersuchungen zum Trocknungsverhalten von Zementsteinproben

Um den Einfluss verschiedener Zementarten auf das Trocknen von Zementestrich und Betonen über längere Zeiträume ohne den Einfluss derer Probenahme bewerten zu können, wurden Probekörper aus Zementstein im Format 20 cm x 20 cm x 6 cm hergestellt (Bild 7), die über mehrere Monate regelmäßig gewogen wurden. Es wurden Wasserzementwerte von 0,30 bis 0,35 gewählt,

This was done in two different ways:

- CM measurement on representative sub-samples taken from the upper and lower halves of the test specimen using a demolition hammer.
- Oven drying in a kiln at 105 °C to constant mass on representative sub-samples taken from the upper and lower halves of the test specimen using a demolition hammer.

The CM measurement was performed as described in [4]. The representativity of the sub-samples was guaranteed by creating a sufficiently large, non-tapering sampling point in each case.

Figs. 2 to 5 show the moisture contents determined for the screeds in accordance with Table 1 by way of CM measurement and oven drying. The figures given for moisture content from CM measurement and oven drying were obtained by taking the average of the moisture contents of the upper and lower sides. The moisture contents determined by way of CM measurement were lower than those from oven drying. This indicates that the CM measurement does not record all the physically bound water. The chronological development of the moisture contents of the screeds with Portland and Portland composite cements did not reveal any systematic difference. The moisture content of the screeds with blast furnace cement was far higher in all cases. As can be seen, the profiles of the moisture contents determined by way of CM measurement and kiln-drying are not constant in all cases. This can presumably be attributed above all to the influence of the sample collection method used.

To investigate whether the results for screeds with cements from „Producer 1“ can be applied to cements of other producers, the above-mentioned tests were repeated using a Portland cement, a Portland limestone cement and a blast furnace cement from two other producers. The higher moisture contents of the screeds with blast furnace cement as compared to the screeds with Portland and Portland limestone cement were confirmed in this process.

In the case of the cements from „Producer 1“, the explanation for the drying behaviour of the screeds with blast furnace cement was to be found in the pore size distribution of the screeds, which

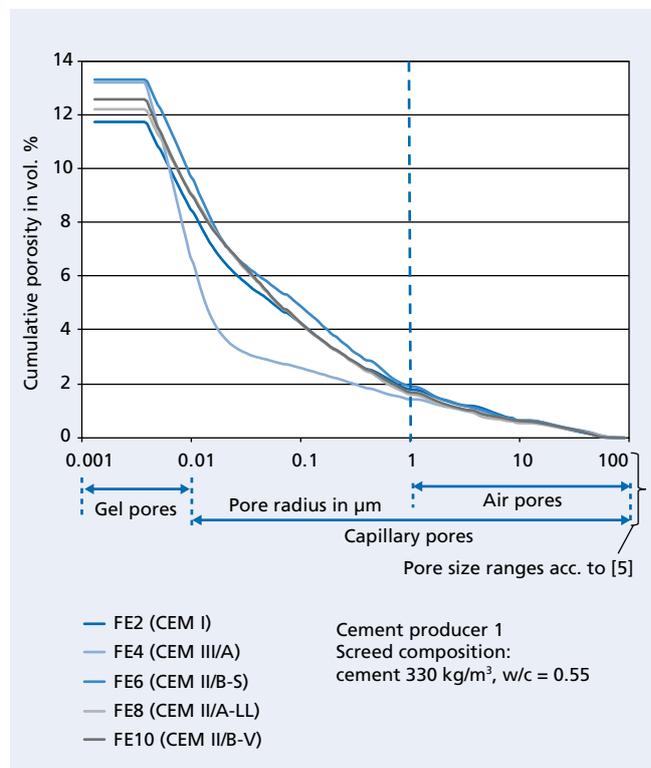


Bild 6: Porosität von Zementestrichen mit Zementen des „Herstellers 1“, 28 Tage nach Herstellung
Figure 6: Porosity of cement screeds made with cements from Producer 1, 28 days after production



Bild 7: Probekörper mit den Abmessungen 20 cm x 20 cm x 6 cm aus Zementstein
Figure 7: 20 cm x 20 cm x 6 cm test specimens made of hardened cement paste

um eine geeignete Konsistenz ohne Sedimentationserscheinungen zu erzielen. Die Probekörper wurden nach ihrer Herstellung vier Tage lang im Klima 20 °C/100 Vol.-% r.F. gelagert, dann bis auf die Oberseite mit einem Butyl-Dichtungsband mit Alukaschiebung abgedichtet und in das Klima 20 °C/65 Vol.-% r.F. umgelagert.

Wie Bild 8 (linker Bereich) zeigt, gaben die beiden Zementsteine mit CEM III/A und CEM II/B-S wesentlich weniger Feuchte an die Umgebung ab als die anderen Zementsteine. Bereits nach 84 Tagen (CEM III/A) bzw. 91 Tagen (CEM II/B-S) hatten die Zementsteine Massenkonzanz erreicht. Die Verwendung von CEM II/B-V und CEM II/A-LL-Zementen führte im Vergleich zum CEM I zu einem größeren Massenverlust.

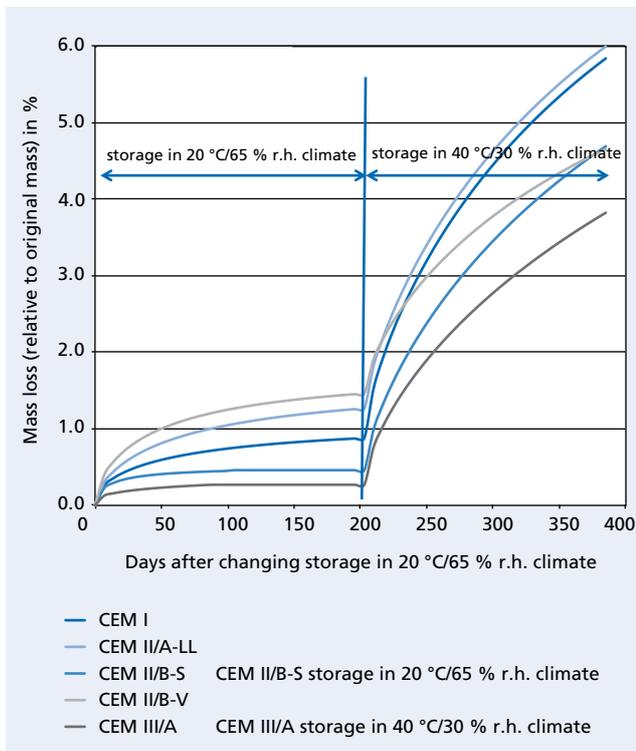


Bild 8: Massenverlust von Zementsteinproben w/z = 0,35 (d. h. zum Zeitpunkt t = 0 ca. 25,9 M.-% Wasser im Zementstein), Hersteller 1
Figure 8: Mass loss from hardened cement paste samples w/c = 0.35 (i.e. at time t = 0 approx. 25.9 mass % water in hardened cement paste), Producer 1

was determined 28 days after production by way of mercury intrusion porosimetry (Fig. 6). As is known from literature (e.g. [5]), the volume of the gel pores increases with an increasing proportion of granulated blast furnace slag and a decreasing proportion of Portland cement clinker in the cement, whereas the proportion of the capillary pores decreases. For the screed with CEM III/A from producer 1, this already becomes apparent 28 days after production (Fig. 6), whereas the profile of the porosity curve for the screed with CEM II/B-S scarcely differs at this point from those with CEM I, CEM II/A-LL and CEM II/B-V. The pore size distribution in the hardened cement paste with CEM III/A is associated with positive durability properties, such as greater resistance to chloride penetration or greater resistance to chemical attack by lime-dissolving carbonic acid or biogenic sulphuric acid, for example [6], but at the same time also with higher moisture contents measured over a lengthy period (see Section 2.3).

2.2 Investigations into the drying behaviour of hardened cement paste samples

To permit assessment of the influence of different cement types on the drying of cement screed and concretes over lengthy periods without the influence of sampling, test specimens made of hardened cement paste measuring 20 cm x 20 cm x 6 cm were produced (Fig. 7) and weighed at regular intervals over a period of several months. Water-cement ratios of between 0.30 and 0.35 were selected in order to achieve a suitable consistency without any sedimentation phenomena. After being produced, the test specimens were stored for four days at 20 °C/100 % relative humidity, then sealed, with the exception of the top side, with an aluminium-laminated butyl sealing tape and transferred to storage at 20 °C/65 % relative humidity.

As can be seen from Fig. 8 (left side), the two hardened cement pastes with CEM III/A and CEM II/B-S gave off far less moisture to the surroundings than the other hardened cement pastes. The hardened cement pastes had attained a constant mass after just 84 days (CEM III/A) and 91 days (CEM II/B-S). The use of CEM II/B-V and CEM II/A-LL cements resulted in a greater mass loss than was the case for CEM I.

After 200 days, the test specimens were transferred from storage at 20 °C/65 % relative humidity to storage at 40 °C/30 % relative humidity, in other words, to conditions better suited to promoting drying (which could be created in winter for example in areas with underfloor heating). The specimens were stored here for a further 185 days, and the mass loss was determined. Fig. 8 (right side) shows the results.

An interesting observation was that the change in mass of the hardened cement paste with CEM II/B-V, which, together with CEM II/A-LL exhibited the greatest loss in mass at 20 °C/65 % relative humidity, was significantly slower following transfer. This can be explained by the fact that the pozzolanic reaction of the fly ash, in other words the formation of C-S-H phases due to the fly ash reacting with the calcium hydroxide liberated on hydration of the clinker component, is given additional „impetus“ by the higher temperatures. This is associated with pore refinement, which makes the hardened cement paste denser.

It can be seen that the hardened cement pastes with Portland slag cement and blast furnace cement attain a constant mass far sooner than the other three hardened cement pastes at 20 °C/65 % relative humidity. The moisture content of these hardened cement pastes (in mass %) remains higher than for comparable cements, but no further moisture is given off to the surroundings even at this earlier point in time. Even following transfer to storage at 40 °C/30 % relative humidity, the hardened cement paste with Portland cement gives off greater amounts of moisture to the surroundings than the hardened cement pastes with Portland composite and blast furnace cements.

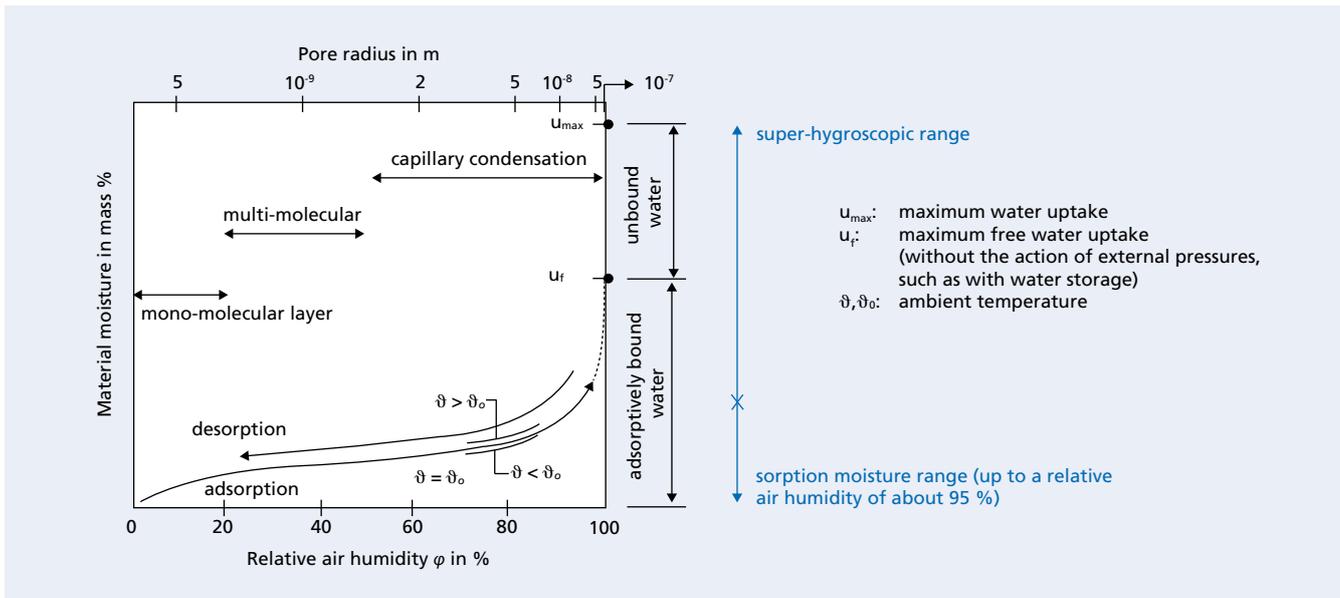


Bild 9: Schematische Darstellung einer typischen Sorptionsisotherme für hygroscopische poröse Baustoffe (basierend auf [12] und [13])
Figure 9: Schematic representation of a typical sorption isotherm for hygroscopic porous building materials (based on [12] and [13])

Nach 200 Tagen wurden die Probekörper aus dem Klima 20 °C/65 Vol.-% r. F. in das Klima 40 °C/30 Vol.-% r.F. umgelagert, und so ein für die Trocknung förderlicheres Klima (welches z.B. im Winter im Bereich einer Fußbodenheizung vorherrschen könnte) gewählt. Dort wurden die Proben weitere 185 Tage gelagert, und der Massenverlust wurde bestimmt. Bild 8 (rechter Bereich) zeigt die Ergebnisse.

Bemerkenswert ist, dass der Zementstein mit CEM II/B-V, der im Klima 20 °C/65 Vol.-% r.F. zusammen mit CEM II/A-LL den größten Massenverlust zeigte, nach der Umlagerung deutlich langsamer seine Masse veränderte. Dies kann damit begründet werden, dass die puzzolanische Reaktion der Flugasche, also die Bildung von C-S-H-Phasen durch Reaktion der Flugasche mit dem bei der Hydratation des Klinkeranteils frei werdenden Calciumhydroxid, durch die höheren Temperaturen einen zusätzlichen „Anschub“ erfährt. Hiermit ist eine Porenverfeinerung verbunden, was den Zementstein dichter macht.

Es kann festgestellt werden, dass die Zementsteine mit Portlandhüttenzement und Hochofenzement im Klima 20 °C/65 Vol.-% r.F. wesentlich früher ihre Massekonstanz erreichen als die anderen drei Zementsteine. Zwar bleibt der Feuchtegehalt dieser Zementsteine (in M.-%) höher als bei den Vergleichszementen, es wird jedoch bereits zu diesem früheren Zeitpunkt keine Feuchte mehr an die Umgebung abgegeben. Auch nach der Umlagerung in das Klima 40 °C/30 Vol.-% r.F. gibt der Zementstein mit Portlandzement größere Feuchtemengen in die Umgebung ab als die Zementsteine mit Portlandkomposit- und Hochofenzementen.

3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen zum Trocknungsverhalten von Zementestrichen und Zementstein zeigten Folgendes:

- Estrichmörtel mit Hochofenzementen CEM III/A wiesen nach einer Lagerung von bis zu einem halben Jahr im Klima 20 °C/65 Vol.-% r.F. höhere Feuchtegehalte (CM-Feuchte und mittels Ofentrocknung bei 105 °C bestimmter Massenanteil der enthaltenen Feuchte) auf als Estriche mit anderen Zementarten.
- Zementsteine mit diesen Hochofenzementen bzw. mit Portlandhüttenzementen zeigten bei Lagerung in den Klimata 20 °C/65 Vol.-% r.F. und 40 °C/30 Vol.-% r.F. deutlich geringere Massenverluste und beim Klima 20 °C/65 Vol.-% r.F. bereits nach wenigen Wochen Massenkonstanz, d.h. es wurde keine weitere Feuchte an die Umgebung abgegeben.

3 Summary and discussion of the results

The investigations into the drying behaviour of cement screeds and hardened cement paste showed the following:

- After storage for up to half a year in a 20 °C/65 % r.h. climate, screed mortars made with CEM III/A blastfurnace cements exhibited higher moisture contents (CM moisture and mass fraction of the contained moisture measured by oven drying at 105 °C) than screeds made with other types of cement.
- After storage in 20 °C/65 vol. % r.h. and 40 °C/30 vol. % r.h. climates hardened cement pastes made with these blastfurnace cements or with Portland-slag cements exhibited significantly lower mass losses and in the 20 °C/65 vol. r.h. climate they reached constant weight after only a few weeks, i.e. no further moisture was given off to the environment from the building materials.

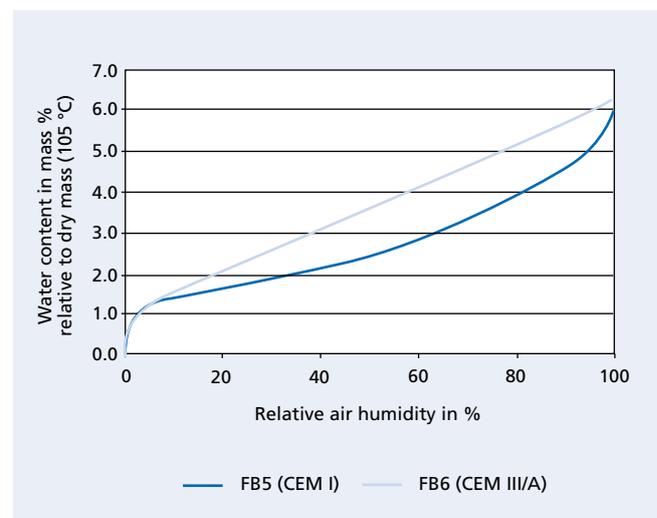


Bild 10: Vergleich des Verlaufs der ermittelten Desorptionsisothermen von Beton mit Portlandzement und Beton mit Hochofenzement (s. Teil 2 dieses Fachbeitrags). Zementgehalt 350 kg/m³; w/z = 0,55)
Figure 10: Comparison of the profiles of the determined desorption isotherms of concrete made with Portland cement and of concrete made with blastfurnace cement (s. Part 2 of this contribution). Cement content 350 kg/m³; w/c = 0.55

Der Feuchtegehalt im Gleichgewichtszustand in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft wird in Form von Sorptionsisothermen angegeben. Bild 9 zeigt den Verlauf einer typischen Sorptionsisotherme für einen porösen hygroskopischen Stoff. Weiterhin sind dargestellt:

- die Bereiche für das Auftreten von Sorptionseffekten (Belegung der Porenwände mit mono- und multimolekularen Schichten und Kapillarkondensation) sowie
- die Radien der rechnerisch dabei bereits gefüllten Poren nach dem Zylinderkapillarporenmodell und der als Kelvinformel bekannten Beziehung zwischen der relativen Luftfeuchte über einer konkav gekrümmten Wasseroberfläche und dem sich einstellenden kapillaren Unterdruck.

Hier wurden keine Sorptionsisothermen für Zementestriche bestimmt. Aus den Sorptionsisothermen für Betone (s. Teil 2 dieses Berichts) können aber vergleichende Betrachtungen angestellt werden. Bild 10 zeigt entsprechende Desorptionsisothermen von Betonen mit Portlandzement und mit Hochofenzement. Es wird deutlich, dass die Ausgleichsfeuchte von Beton bzw. Estrich mit Hochofenzement bei üblichen relativen Luftfeuchten höher liegt als die von Estrichen mit Portlandzement. Dies kann mit dem Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und der maximalen Größe der bei dieser Luftfeuchte gefüllten Poren (Bild 9, oben) begründet werden: bei einem vergleichbaren Gesamtporenanteil hat Zementstein mit Hochofenzement einen höheren Gelporenanteil als Zementstein mit Portlandzement und weist daher bereits bei geringeren relativen Luftfeuchten höhere Ausgleichsfeuchten auf.

Die Vorgabe eines maximalen Feuchtegehalts, ausgedrückt in CM-% oder M-%, berücksichtigt nicht die Zementart, die Porenverteilung im Zementstein und das hieraus resultierende Austrocknungsverhalten von Zementestrichen. Ein Maximalwert für den Feuchtegehalt, der anhand des Trocknungsverhaltens von Estrichen mit Portlandzement definiert wurde, kann bei Verwendung eines Hochofenzements aufgrund der Sorptionsisotherme des Estrichmörtels möglicherweise nicht unterschritten werden. Gleichzeitig sind die Masse und Geschwindigkeit des zu erwartenden weiteren Feuchteverlusts, die letztlich entscheidend für das mögliche Auftreten von Schäden an Fußbodenkonstruktionen sind, i.d.R. bei der Verwendung von Hochofenzementen geringer als bei Estrichen z.B. mit Portlandzement. Die aufgrund des Trocknungsverhaltens bestehenden Vorbehalte bei Hochofenzementen und einigen Portlandkompositzementen erscheinen damit unbegründet.

Eine Festlegung von Maximalwerten für die relative Luftfeuchte im Baustoff wäre eine Möglichkeit, die Belegreife unabhängig von der Porenverteilung und Sorptionsisotherme des Estrichs zu definieren. [7] legt dar, dass den bisher in Deutschland üblichen Methoden zur Definition der Belegreife die wissenschaftliche und technische Basis fehlt und sich z.B. Schnellestriche in diesem Zusammenhang einer nachvollziehbaren Festlegung der Belegreife entziehen. Er empfiehlt daher die Bewertung der relativen Luftfeuchte im Estrich, und schlägt auf der Grundlage seiner Erfahrungen folgende Grenzwerte vor:

- 75 % als maximale relative Luftfeuchte für Zementestriche mit diffusionsdichten Oberböden/Beschichtungen,
- 55 % als maximale relative Luftfeuchte für Zementestriche mit Oberboden aus Parkett.

Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass für eine nachvollziehbare Festlegung von Maximalwerten weiterer Forschungsbedarf besteht.

In anderen Teilen Europas ist die Messung und Bewertung der relativen Luftfeuchte in Baustoffen bereits üblich:

- Die skandinavische Norm [8] beschreibt die Messung der relativen Feuchte in Beton über das Einführen von Feuchte-sensoren in vorab hergestellte Bohrlöcher.
- [9] beschreibt ein Verfahren zur Messung der relativen Luftfeuchte in geschlossenen, mit Betonbruchstücken gefüllten Glaszylindern.

The moisture content in the equilibrium state in relation to the relative air humidity of the ambient air is represented in the form of sorption isotherms. Fig. 9 shows the profile of a typical sorption isotherm for a porous, hygroscopic, material. Also shown are:

- the regions for the occurrence of sorption effects (covering the pore walls with mono- and multi-molecular layers and capillary condensation), as well as
- the radii of the pores that are already filled, calculated by the cylindrical capillary pore model, and the relationship, known as the Kelvin formula, between the relative air humidity above a water surface with concave curvature and the ensuing capillary negative pressure.

In this project no sorption isotherms were determined for the cement screeds. However, comparable observations can be carried out from the sorption isotherms for concretes (Part 2 of this report). Fig. 10 shows corresponding desorption isotherms for concretes made with Portland cement and with blastfurnace cement. It is shown that at normal relative air humidities the equilibrium moisture content of concretes and screeds made with blastfurnace cement is higher than that of screeds made with Portland cement. This can be explained by the relationship between the relative air humidity and the maximum size of the pores filled at this air humidity (Fig. 9, top). For a comparable total pore fraction, hardened cement paste made with blastfurnace cement has a higher gel pore fraction than hardened cement paste made with Portland cement and therefore exhibits higher equilibrium moisture levels, even at lower relative air humidities.

Stipulation of maximum moisture content, expressed in CM % or mass %, does not take account of the cement type, the pore distribution in the hardened cement paste or the resulting drying behaviour of cement screeds. Because of the sorption isotherm of the screed mortar it may not be possible, when using a blastfurnace cement, to obtain a value lower than the maximum value for the moisture content that has been defined on the basis of the drying behaviour of screeds made with Portland cement. At the same time the mass and rate of the expected further moisture loss, which are ultimately decisive for the possible occurrence of damage in floor structures, are as a rule lower when using blastfurnace cements than with screeds made with, for example, Portland cement. The reservations against blastfurnace cements and some Portland composite cements that exist because of the drying behaviour therefore appear to be unfounded.

Specifying a maximum value for the relative air humidity in a building material would be one possible way of defining the readiness for laying floor coverings, regardless of the pore distribution and sorption isotherm of the screed. [7] shows that the methods normally used so far in Germany for defining the readiness for covering lack any scientific or technical basis and in this connection there is no reproducible determination of the readiness for covering of, for example, rapid-hardening screeds. It is therefore recommended that the relative air humidity in the screed should be evaluated and, on the basis of experience, the following limits are proposed:

- 75 % as the maximum relative air humidity for cement screeds with top layers/coverings that are impermeable to diffusion,
- 55 % as the maximum relative air humidity for cement screeds covered by wood flooring.

However, it should be pointed out that there is a need for further research for reproducible determination of maximum values.

Measurement and evaluation of the relative air humidity in building materials is already accepted in other parts of Europe:

- The Scandinavian standard [8] describes the measurement of the relative moisture content into concrete through the introduction of moisture sensors in drill holes made beforehand.
- [9] describes a method for measuring the relative air humidity in closed glass cylinders filled with concrete fragments.

- Laut der Britischen Norm [10] wird die relative Luftfeuchte in einem kleinen abgedichteten Luftvolumen, welches sich im Gleichgewicht mit einer Estrichoberfläche befindet („sealed humidity box“), über ein Hygrometer gemessen. Ein maximaler Grenzwert von 75 % für die relative Estrichfeuchtigkeit wird bei allen Bodenbelägen, bis auf Holzböden, genannt. Bei Holzböden sollte der jeweilige Lieferant befragt werden.

Hinweise zur „Messung der korrespondierenden relativen Luftfeuchte (KRL-Messung)“ an Stemmgut aus Zement- und Calciumsulfatestrichen gibt es auch [11]. Hiernach wird eine aus dem Estrich entnommene Stemmprobe zerkleinert und in einen Plastikbeutel gefüllt. Die im Beutel vorhandene Luft wird herausgestrichen und die sich im Beutel einstellende relative Luftfeuchte bestimmt.

In einem Nachfolgevorhaben zu dem hier dargestellten Projekt wird daher überprüft werden,

- ob die Messung und Bewertung der relativen Luftfeuchte in Zementestrichen zu einer Beurteilung der Belegreife führt, die den Charakteristika verschiedener Zementarten hinsichtlich ihres Porengefüges und ihrer Sorptionsisothermen besser Rechnung trägt als die derzeit ermittelten Feuchtegehalte im Zementestrich, ausgedrückt in CM-% oder M.-%,
- wie lange eine Messung der relativen Luftfeuchte im Baustoff dauern muss, um belastbare relative Luftfeuchten als Messergebnis ablesen zu können,
- welche Grenz- bzw. Richtwerte der relativen Luftfeuchte im Estrich für das Aufbringen verschiedener Bodenbeläge geeignet wären. Bisher seitens der Baustoffverbände der Bodenbeläge vorgeschlagene Werte werden von den estrichverarbeitenden Betrieben bzw. ihren Verbänden als zu niedrig bewertet.

- In accordance with the British standard [10] the relative air humidity is measured by a hygrometer in a small, sealed, air volume that is in equilibrium with a screed surface (sealed humidity box). A maximum limit of 75 % is given for the relative screed moisture for all floor covering except for wooden floors. For wooden floors the respective supplier is to be consulted.

There is also advice in [11] on “Measuring the corresponding relative air humidity” in material taken from cement and calcium sulfate screeds. According to this a sample taken from the screed is crushed and placed in a plastic bag. The air contained in the bag is pushed out and the relative air humidity established in the bag is determined.

In a follow-up project to the project described here it will therefore be checked

- whether the measurement and evaluation of the relative air humidity in cement screeds leads to an assessment of the readiness for covering that takes better account of the characteristics of differing types of cement with respect to their pore size distribution and sorption isotherms than the moisture contents currently determined in cement screeds, expressed in CM % or mass %,
- how long a measurement of the relative air humidity in building materials must last in order to obtain a test result that gives reliable relative air humidities,
- what limits or guide values for the relative air humidity in a screed would be suitable for the application of different floor coverings. The values recommended in the past by the building materials trade associations for floor coverings have been evaluated as too low by the screed-placing companies and their associations.

Literatur / Literature

- [1] DIN EN 1992-1-2:2010-12 „Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall“
- [2] DIN 18560-1:2015-11 „Estriche im Bauwesen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Prüfung und Ausführung“
- [3] Fire design of concrete structures, state of the art report. International Federation for Structural Concrete (fib), 2007
- [4] Erning, O. et al.: So messen Sie die Restfeuchte – CM Messung. Fliesen und Platten (2007) H. 8
- [5] Romberg, H.: Zementsteinporen und Betoneigenschaften. Beton-Informationen 18 (1978) H. 5
- [6] Ehrenberg, A.: Hüttensand – Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft, Teil 1. Beton-Informationen 46 (2006) H. 4
- [7] Rieche, G.: Bewertung der Belegreife von Estrichen mit hygrometrischen Verfahren. EstrichTechnik & Fußbodenbau 143 (2008) H. 1/2
- [8] NT Build 439:195-11 “Nordtest method. Concrete, hardened: relative humidity measured in drilled holes”
- [9] NT Build 490: 1999-11 “Nordtest method: Concrete, hardened: Self Dessiccation”
- [10] BS 8203:2001-1 “British Standard: Code of practice for installation of resilient floor coverings”
- [11] Belegreife und Feuchte – Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen. Technische Kommission Bauklebstoffe, Bericht 2, 2013
- [12] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität Essen, Essen 1983
- [13] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Univ. Stuttgart, Fak. Bauingenieur- und Vermessungswesen, Stuttgart 1994

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

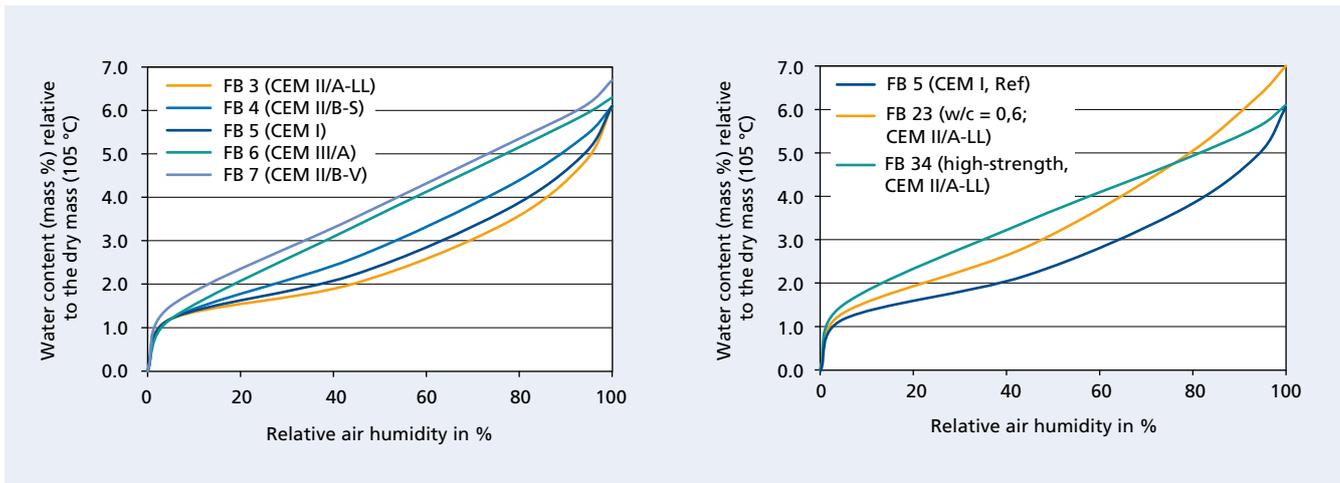


Bild 1: Desorptionsisothermen ausgewählter Betone im Versuchsprogramm
Figure 1: Desorption isotherms of selected concretes in the test programme

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

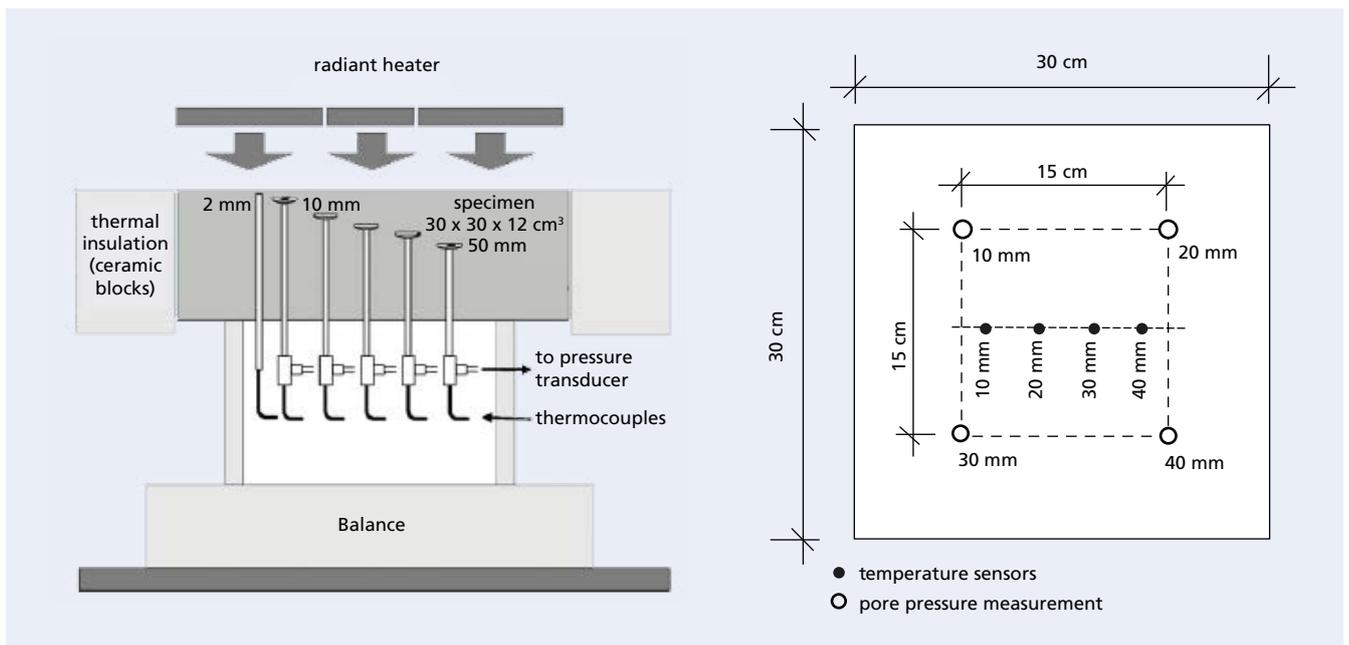


Bild 2: Versuchsaufbau nach [7] (links) und Anordnung der Messpunkte im VDZ (rechts)
Figure 2: Test set-up according to [7] (left) and positions of the test points at the VDZ (right)

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

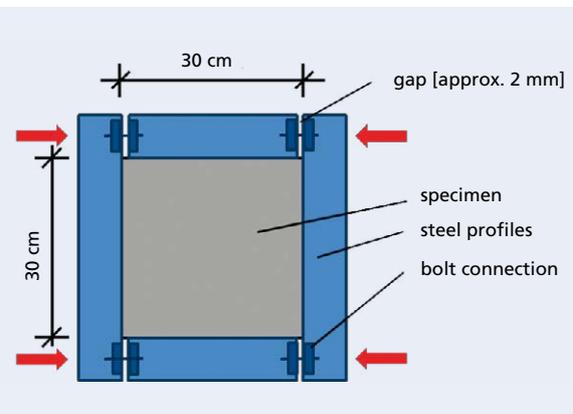


Bild 3: Aufbringen einer Druckbelastung auf den Probekörper bei den Versuchen im VDZ
 Figure 3: Application of a compressive load on the specimen in the tests at the VDZ

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 ± 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 ± 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 ³ , 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 ³	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 ³		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 ³ cement, 50 kg/m ³ silica fume, 175 l/m ³ 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

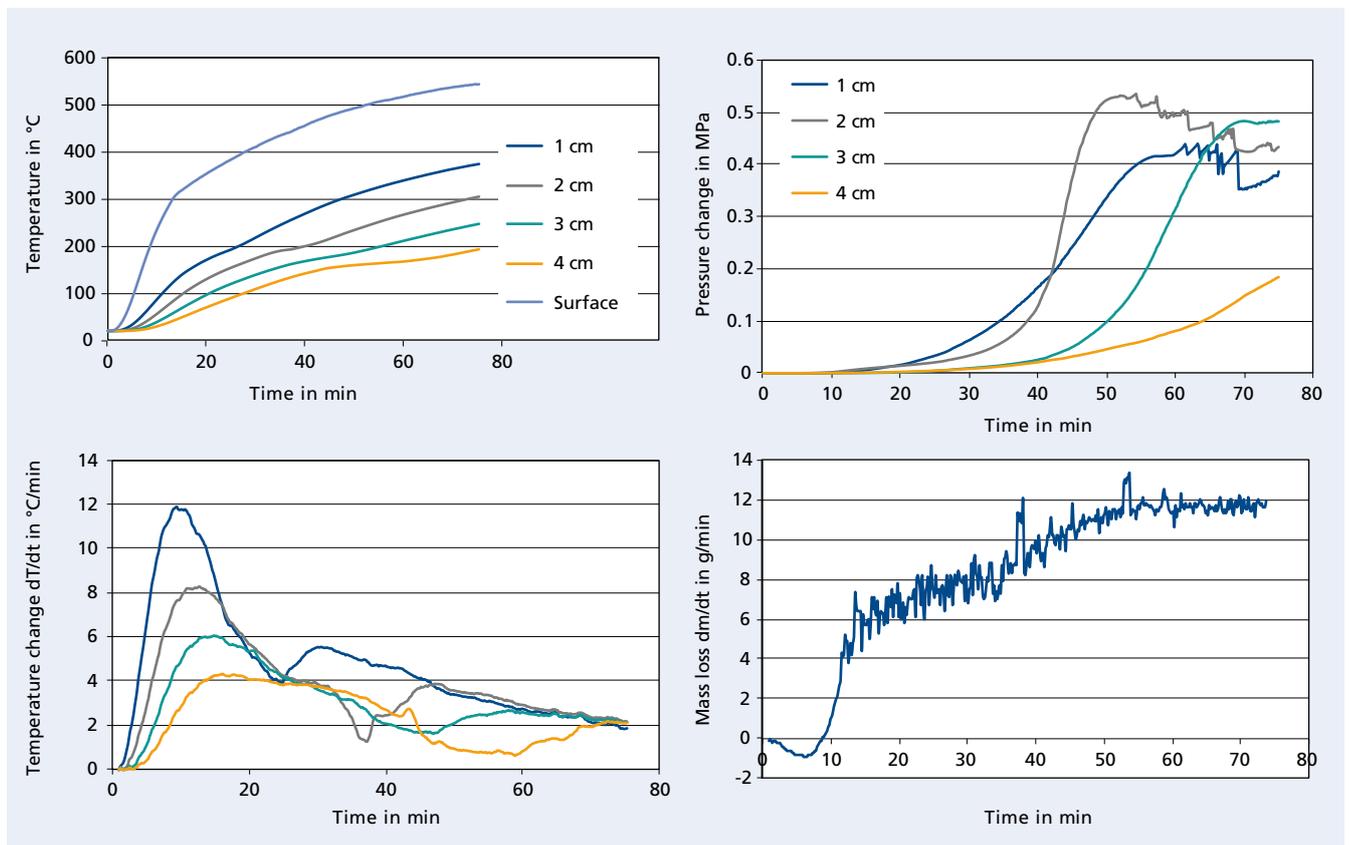


Bild 4: Ergebnisse eines typischen PTM-Versuchs, bei dem kein Abplatzen auftrat (Maximaltemperatur 750 °C)
Figure 4: Results of a typical PTM test in which no spalling occurred (maximum temperature 750 °C)



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

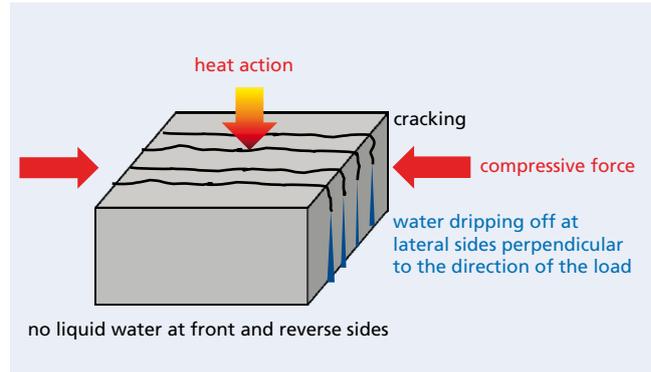


Bild 6: Erklärung für den beobachteten Wasseraustritt

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

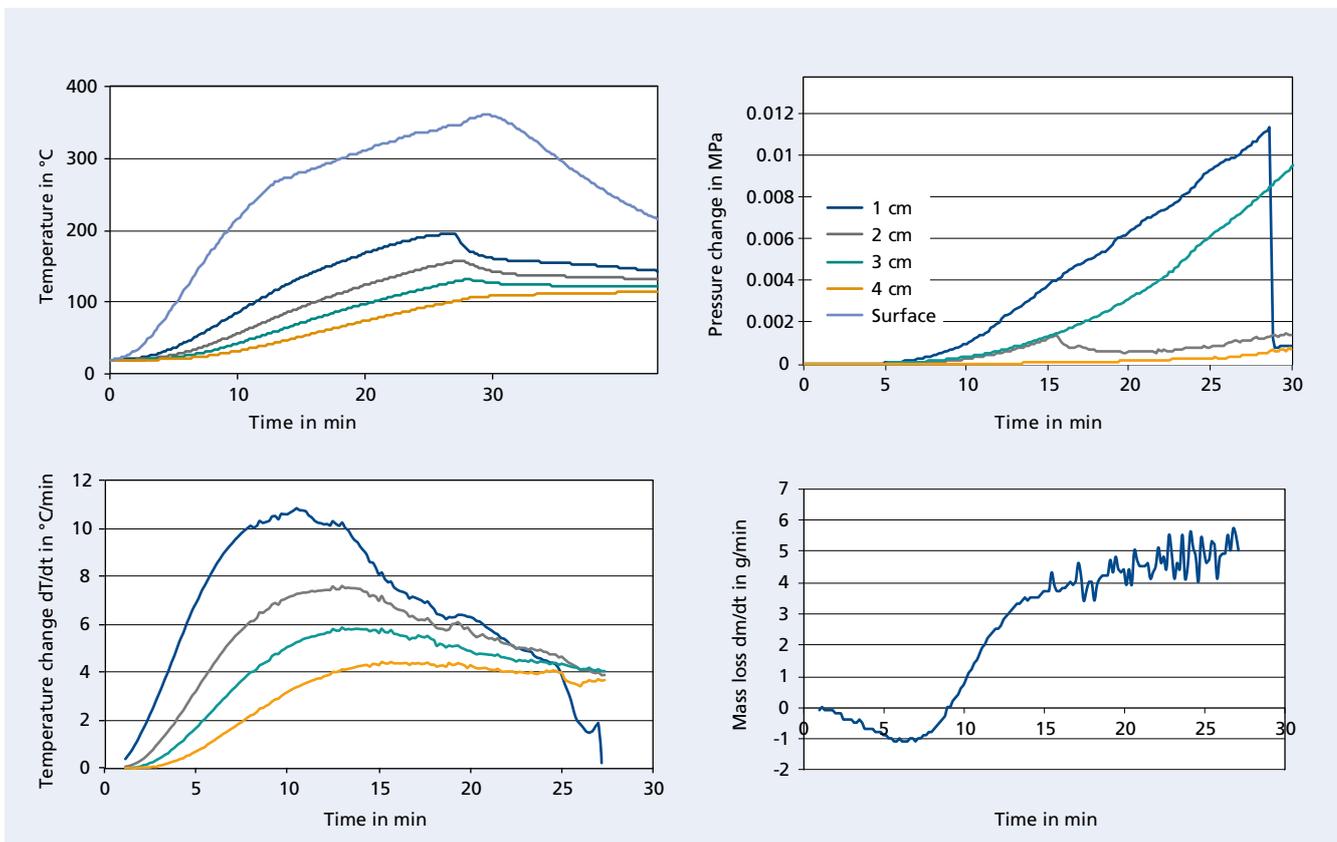


Bild 7: Ergebnisse eines typischen PTM-Versuchs, bei dem Abplatzen auftrat (hier: FB 6) Abplatzen und Versuchsabbruch nach ca. 27 min

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 $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (statt $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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: Abgeplatze 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 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 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 $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (instead of $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 O₂-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 O₂-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 Portlandflugaschezement 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