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

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 Feuchtespeicherung 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.
- 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 Carbid-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 Carbid-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 Portlandcomposite (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 uncertainities 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 unterscheide, 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 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,

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/m³, w/c = 0.65, Rhine sand/gravel B8	FE1	FE3	FE5	FE7	FE9
Cement content 330 kg/m³, w/c = 0.55, superplasticizer 1 mass % w.r.t. cement, Rhine sand/gravel B8	FE2	FE4	FE6	FE8	FE10

 Tabelle 1: Untersuchte Estrichzusammensetzungen mit Zementen des "Herstellers 1"

 Table 1: Screed compositions investigated with cements from "Producer 1"

werden, wenn die Heißbemessung über Rechenverfahren erfolgt. Nur wenn die in der Norm angegeben 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 – hergewhereas 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)

stellt. Hierzu wurden Formen aus Hartschaumplatten vorbereitet, die an der Innenseite mit diffusionsdichtem Klebeband 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.





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)

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 Stemmhammer 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 Stemmhammer 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 Alukaschierung 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 Massenkonstanz 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 hygroskopische 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 enthalten 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 blast-furnace 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 f
 ür das Auftreten von Sorptionseffekten (Belegung der Porenw
 ände 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 f
 ür 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 Feuchtesensoren 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 decicive 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 hygrometischen 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 Dessication"
 [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 Feuchteransport 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