

Sonderdruck

# Tunnel

Ausgabe 06/2010



■ **Nassspritzbeton-  
Performance –  
Laborprüfverfahren  
und Einflussfaktoren  
in der Praxis**

Dr. Peter Boos, Ennigerloh  
Dr. Martina Dietermann, Leimen

**HEIDELBERGCEMENT**

# Nassspritzbeton- Performance – Laborprüfverfahren und Einflussfaktoren in der Praxis

Dr. P. Boos, Dr. Martina Dietermann

Die Anwendung von Spritzbeton ist aus dem Tunnelbau nicht wegzudenken. In dem vorliegenden Beitrag werden sowohl innovative Verfahren zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Nassspritzbeton als auch die Auswirkung zement- und betontechnologischer sowie umgebungsbedingter Einflüsse vorgestellt. Anschaulich wird gezeigt, dass über eine gezielte Zementmodifizierung die Spritzbeton-Performance in Abhängigkeit vom verwendeten alkalifreien Beschleuniger beeinflusst werden kann.

Spritzbeton ist ein Hochleistungsprodukt, das durch Spritzen mit hoher Geschwindigkeit aufgetragen und durch den Aufprall verdichtet wird. Durch die Zugabe von Spritzbetonbeschleuniger (Beschleuniger) an der Düse erstarrt der Beton sofort nach dem Aufprall. Anschließend an dieses anfängliche Erstarren ist im Tunnelbau eine an die Vortriebsgeschwindigkeit angepasste schnelle Frühfestigkeitsentwicklung des Betons erforderlich [1–4].

Spritzbeton wird entweder im Trocken- oder Nassspritzverfahren eingebaut. Sinnvoll ist der Einsatz von Nassspritzbeton, wenn hohe Förderleistungen notwendig sind; deshalb hat sich im Tunnelbau Nassspritzbeton durchgesetzt [1–4]. Der Zementgehalt liegt üblicherweise zwischen 360 und 420 kg/m<sup>3</sup>.

Die Beschleunigung des Nassspritzbetons erfolgt heute in vielen Ländern aufgrund großer Vorteile auf dem Gebiet

# Wet Shotcrete Performance – Laboratory Test Methods and influen- cing Factors in Practice

Dr. P. Boos, Dr. Martina Dietermann

The application of shotcrete is something inextricably linked with tunnelling. In this report innovative methods for investigating the performance of wet shotcrete as well as the effect of cement and concrete technological influences as well as those governed by the environment are presented. It will be shown that the shotcrete performance can be influenced by the applied non-alkaline accelerator through targeted modification of the cement.

Shotcrete is a high-performance product, which is placed through spraying at high speed and compacted by the impact: By adding shotcrete accelerator (accelerator) at the nozzle the shotcrete sets immediately following impact. Following up on this initial setting a rapid early strength development for the concrete is required in tunnelling [1–4].

Shotcrete is placed either by the dry or wet spraying method. The application of wet shot-

crete is advisable if high delivery rates are required so that consequently wet shotcrete has established itself in tunnelling [1–4]. The cement content usually amounts to between 360 and 420 kg/m<sup>3</sup>.

Acceleration of the wet shotcrete nowadays takes place in many countries via non-alkaline accelerators which provide major advantages in the field of industrial health and safety. Usually these are based on an

der Arbeitshygiene/-sicherheit durch alkalifreie Beschleuniger. Diese basieren in der Regel auf Aluminiumhydroxid-Aluminiumhydroxosulfat-Abmischung. Die europäische Spritzbeton-Norm DIN EN 14487 [1] definiert „alkalifreie Beschleuniger“ als Beschleuniger, deren  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $\leq 1\%$  ist (Bild 1).

Praxiserfahrungen haben gezeigt, dass die Wirksamkeit dieser Beschleuniger mit unterschiedlichen Zementen stark variiert. Um gezielt die Wechselwirkung von Zement mit Erstarrungsbeschleunigern zu optimieren, wurden bei HeidelbergCement die Zusammenhänge zwischen Zementparametern, Umweltparametern und Beschleuniger-Wirksamkeit untersucht. Hierzu war es zunächst notwendig, ein einfaches Laborprüfverfahren zu konzipieren: Der neu entwickelte HeidelbergCement-Abreißtest ermöglicht die Prüfung des spontanen Erstarrungsverhaltens am Zementleim direkt nach Beschleuniger-Zugabe und damit die Identifizierung relevanter technischer Parameter im Labormaßstab. Kombiniert mit mineralogischen Untersuchungen konnte die Beschleuniger-Wirkung auf die frühe Hydratation intensiver untersucht werden.

Das auf das spontane Erstarrungsverhalten folgende weitere Festigkeitsverhalten sollte an einem möglichst realen System untersucht werden. Hierfür wurde bei HeidelbergCement ein Laborspritzstand eingerichtet. Zusätzlich wurden mehrere Großversuche durchgeführt, um die im Labor gefundenen Ergebnisse zu verifizieren.

### Anforderungen an das Zement-Beschleuniger-System und Möglichkeiten der Prüfung

Alkalifreie Beschleuniger werden dem Spritzbeton an der

Spritzdüse zugegeben. Der Beschleuniger übernimmt zwei Aufgaben: Erstarrungsbeschleunigung und Frühfestigkeitserhöhung.

Bisherige Praxiserfahrungen mit alkalifreien Beschleunigern haben gezeigt, dass die Wirksamkeit unterschiedlicher alkalifreier Beschleuniger mit unterschiedlichen Zementen variiert. Diese Tatsache, dass verschiedene Zemente unterschiedliche Beschleuniger-Dosierungen erfordern, wirft zwangsläufig die Fragestellung auf, welche Kriterien über die Wirksamkeit der Zement-Beschleuniger-Kombination entscheiden, also von welchen chemisch-physikalischen Parametern die benötigte Beschleuniger-Dosierung abhängt.

Ein hierfür geeignetes Laborprüfverfahren muss einfach und reproduzierbar sein und möglichst exakt die Praxisbedingungen widerspiegeln: Auf der Baustelle wird der Beton hydraulisch gepumpt und unter Zugabe von alkalifreiem Beschleuniger an die Wand gespritzt. Die Druckluft reißt den Betonstrom an der Düse auf und spritzt den Beton mit hoher Geschwindigkeit an die Auftragsfläche. Dies führt zu einer homogenen Durchmischung des Betons mit Beschleuniger. Die Zeit zwischen der Beschleuniger-Zugabe und dem Auftreffen des beschleunigten Betons auf der Wand beträgt nur Sekundenbruchteile. Direkt nach dem Auftreffen auf die Wand erstarrt der Beton, so dass im Spritzverfahren Schichten aufgebaut werden können. Ein Laborverfahren, mit dem die Erstarrungsbeschleunigung beurteilt werden soll, muss diese technischen Abläufe des Spritzvorganges auf einfache Weise, idealerweise an Leimproben, reproduzierbar simulieren. Das bedeutet, dass direkt nach Zugabe des Beschleunigers ein sehr kurzer und intensiver Ho-



1 Düse mit Druckluft und Beschleuniger-Zugabe

1 Nozzle with compressed air and addition of accelerator

aluminium hydroxide-aluminium hydroxosulphate mix. The European shotcrete norm DIN EN 14487 [1] defines “non-alkaline accelerators” as accelerators with a  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalent of  $> 1\%$  (Fig. 1).

Findings in practice have revealed that the efficacy of these accelerators varies when different cements are applied. In order to optimise the interaction between cement and setting accelerators as far as possible the interrelationships between cement parameters, environmental parameters and accelerator efficacy were investigated at HeidelbergCement. Towards this end it was first of all essential to devise a simple lab test method: the newly developed HeidelbergCement pull-off test facilitates the examination of the spontaneous solidification behaviour of the cement paste immediately after accelerator is added and in turn the identification of relevant technical parameters on a laboratory scale. Combined with mineralogical investigations the accelerator effect on the early hydration was examined more intensively.

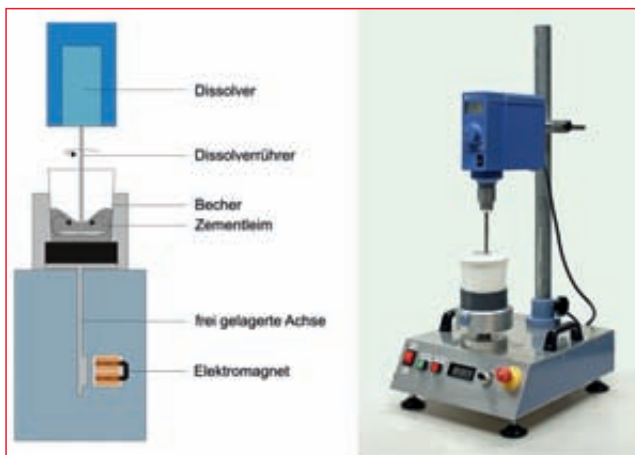
The further strength behaviour following on from spontaneous solidification should be examined as far as possible using a genuine system. Towards this end a lab spraying stand was set up at HeidelbergCement. In addition a number of major tests were carried out in order to verify the results obtained in the lab.

### Requirements on the Cement-Accelerator System and Possibilities for Testing

Non-alkaline accelerators are added to the shotcrete at the spraying nozzle. The accelerator takes over two tasks: accelerating solidification and increasing the early strength.

Practical findings so far obtained with non-alkaline accelerators have shown that the efficacy of various non-alkaline accelerators varies with different cements. The fact that different cements require different dosages of accelerator inevitably leads to the question which criteria decide on the efficacy of the cement-accelerator combination i.e. as to which chemical-





2 Abreißtest-Gerät von HeidelbergCement zur Bestimmung der Wirksamkeit von alkalifreiem Beschleuniger

2 Pull-off test unit devised by HeidelbergCement to establish the efficacy of non-alkaline accelerators

mogenisierungsprozess stattfinden muss, wonach das System sofort zur Ruhe kommt.

Problematisch in Laborversuchen ist der sofort eintretende starke Konsistenzverlust des Betons, Mörtels oder Leims nach Zugabe von alkalifreiem Beschleuniger. Dadurch werden einige bei Verwendung von alkalihaltigen Beschleunigern etablierte Laborprüfverfahren schwer handhabbar, da ein Umfüllen der Probe, z. B. in den Vicat-Ring, nach dem Anmischen nahezu unmöglich ist.

Zur systematischen Untersuchung des Erstarrungsverhaltens und aussagekräftigen Beurteilung der Wirksamkeit des Zement-Beschleuniger-Systems wurde aus diesem Grund von der HeidelbergCement AG ein Laborprüfverfahren [2] entwickelt, mit dem die wesentlichen Randbedingungen der Baustelle einfach und wiederholbar simuliert werden können: Der Abreißtest (Bild 2).

Um den Anforderungen des Vortriebs gerecht zu werden, muss jedoch nicht nur das spontane Erstarrungsverhalten des Nassspritzbetons bestimmten Anforderungen genügen, sondern auch die weitere Festigkeitsentwicklung. Für eine

Klassifizierung der Leistungsfähigkeit des Nassspritzbetons werden die in Bild 3 gezeigten Frühfestigkeitsklassen  $J_1$ ,  $J_2$  und  $J_3$  [1, 3] herangezogen. Diese geben in Abhängigkeit vom Alter nach Beschleunigerzugabe Bereiche für die Druckfestigkeit vor. Gemäß [3] gilt: Spritzbeton der Frühfestigkeitsklasse  $J_1$  eignet sich für den Auftrag von dünnen Lagen auf trockenem Untergrund ohne besondere statische Anforderungen und hat den Vorteil von wenig Staubentwicklung und Rückprall. Spritzbeton sollte der Frühfestigkeitsklasse  $J_2$  entsprechen, wenn er in dicken Lagen auch über Kopf mit hoher Leistung aufgetragen werden soll, wenn leichter Wasserandrang ansteht, wenn der junge Spritzbeton durch unmittelbar nachfolgende Arbeitsschritte beansprucht wird, wie Bohren von Ankerlöchern, Eintreiben von Dielen oder Erschütterung durch Sprengschlag, oder wenn rasch auftretende Einwirkungen aus Gebirgsdruck, Erddruck oder nachdrängende Lasten aufgenommen werden müssen.  $J_3$  sollte wegen erhöhter Staubentwicklung und gesteigertem Rückprall nur angewendet werden, wenn eine derart

physical parameters the necessary dosage of accelerator depends.

A corresponding lab test method must be straightforward and reproducible and reflect practical conditions as far as possible. On-site the concrete is pumped hydraulically and sprayed on to the wall after non-alkaline accelerator has been added. Compressed air agitates the flow of concrete at the nozzle and sprays the concrete on to the application area at high speed. This leads to the concrete mixing homogeneously with the accelerator. The period between the addition of the accelerator and the accelerated concrete hitting the wall only amounts to fractions of a second. The concrete solidifies immediately after impacting the wall so that layers can be built up using the spraying method. A lab method by means of which the solidification acceleration can be assessed must reproducibly simulate the technical processes of this spraying phase in a simple manner, ideally using paste samples. This means that directly after the addition of the accelerator a very short and intensive homogenisation process has to take place after which the system has to come to rest immediately.

The pronounced loss of consistency by the concrete, mortar or paste after the addition of non-alkaline accelerators that occurs represents a problem in lab tests. As a result a number of established lab test methods applied in conjunction with non-alkaline accelerators are difficult to manage as it is practically impossible to transfer the sample e.g. into the Vicat ring after mixing.

For the systematic investigation of the solidification behaviour and a meaningful assessment of the efficacy of the cement-accelerator system, the HeidelbergCement AG conse-

quently developed a lab test method [2] by means of which the significant general conditions prevailing on-site can be simulated simply and repetitively (Fig. 2).

In order to comply with the demands of the excavation the following strength development is also required in addition to the spontaneous solidification behaviour of the wet shotcrete. For classifying the performance of the wet shotcrete the early strength classes  $J_1$ ,  $J_2$  and  $J_3$  [1, 3] are applied. These provide sectors for the compressive strength depending on the age after the addition of accelerator.

According to [3] the following apply: shotcrete of the early strength class  $J_1$  is suitable for application in thin layers on a dry subsurface without any special static requirements and possesses the advantage of little dust development and rebound. Shotcrete should correspond to early strength class  $J_2$  if it is to be applied at a high rate in thick layers also overhead if a small amount of water is present should the young shotcrete still be influenced by subsequent work phases that follow up immediately such as drilling anchor holes, installing planks or vibrations resulting from blasting or if rapidly occurring effects from rock pressure, earth pressure or ensuing loads have to be accounted for.  $J_3$  should only be used if extremely high early strength is essential, should for example pronounced ingressing water prevails, there are static requirements or a rapidly advancing drive on account of the enhanced dust development and increased rebound.

The early strength development of a shotcrete can only be tested on itself. As a result a spraying stand for the production of wet shotcrete on a lab scale was set up at HeidelbergCement.

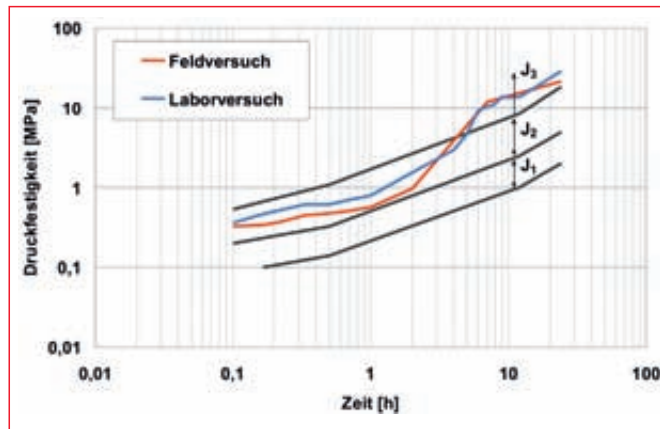
hohe Frühfestigkeit unabdingbar ist, wie z. B. bei starkem Wasserandrang, statischem Erfordernis oder raschem Vortrieb.

Die Festigkeitsentwicklung eines Spritzbetons kann nur an diesem selbst geprüft werden. Deshalb wurde bei Heidelberg-Cement ein Spritzstand für die Herstellung von Nassspritzbeton im Labormaßstab errichtet.

### Abreißfest [2]

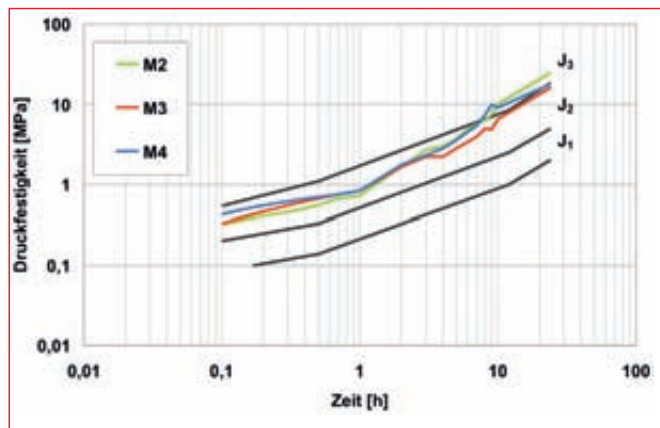
Das entwickelte Messgerät ermöglicht die Beurteilung des Erstarrungsverhaltens einer Zement-Beschleuniger-Kombination an einer Leimprobe. Hierfür wird die Leimprobe mit vorgegebener Konsistenz im Hobartmischer hergestellt. Anschließend wird eine definierte Menge dieser in einen Becher gefüllt, der mit Hilfe einer Halterung auf der vertikal gelagerten Achse des Messgerätes befestigt wird. Eine festgelegte elektromagnetische Kraft fixiert die Achse. Der Leim wird zunächst 1 Minute mit 600 U/min homogenisiert. Im Anschluss wird der alkali-freie Beschleuniger in den bewegten Leim gespritzt. Die hohe Rührgeschwindigkeit gewährleistet eine schnelle homogene Durchmischung von Beschleuniger und Zementleim und simuliert die Prozesse beim Spritzen unter Praxisbedingungen. Wenn die zugegebene Beschleunigermenge für eine adäquate Erstarrung des Zementleims ausreicht, reißt sich die Achse durch die vom Becher auf diese übertragenen Scherkräfte vom Haltemagnet los und das Gerät schaltet den Dissolver automatisch ab. Die notwendige Abreißkraft wurde als Maß für ein ausreichendes Erstarren über verschiedene Baustellenkombinationen kalibriert.

Das Verfahren eignet sich einerseits für die Identifizierung



3 Vergleich der Ergebnisse des Laborspritzstandes mit der Praxis: Zementgehalt, w/z-Wert und Beschleuniger-Dosierung (6 %) sowie Umgebungstemperaturen waren annähernd vergleichbar

3 Comparison of the results from the lab spraying stand with practice: cement content, w/c value and accelerator dosage (6 %) as well as surrounding temperatures were approximately comparable



4 Vergleich unterschiedlicher Betonzusammensetzungen des Laborspritzstandes

4 Comparison of various concrete compositions from the lab spraying stand

eines auf einen bestimmten Zement passenden Beschleunigers – in diesem Fall kann die Konsistenz des Zementleims über den Wassergehalt des Leims eingestellt werden – und andererseits für den Vergleich unterschiedlicher Zemente mit einem oder unterschiedlichen Beschleunigern – in diesem Fall muss der Wasserzementwert des Zementleims konstant gehalten und die Konsistenz über Fließmittel eingestellt werden.

Das Verfahren weist eine Empfindlichkeit im Bereich von

### Pull-off Test [2]

The measurement unit that was devised facilitates the assessment of the solidification behaviour of a cement-accelerator combination on a paste sample. For this purpose the paste sample was produced in the Hobart mixer with a defined consistency. Subsequently a defined quantity of this is filled into a beaker, which is attached to the vertically positioned axis of the measurement unit with the aid of a holder. A predeter-

mined electromagnetic force secures the axis. The paste is first of all homogenised for 1 min at 600 rpm. Then the non-alkaline accelerator is sprayed into the treated paste. The high stirring rate assures rapid homogeneous mixing of the accelerator and the cement paste and simulates the processes during spraying under practical conditions. Once the added amount of accelerator suffices for adequate solidification of the cement paste the axis releases itself from the holding magnet as a result of the shearing forces acting on it from the beaker and the unit automatically switches off the dissolver. The required pull-off force was calibrated for sufficient solidification via various site combinations.

The method is on the one hand suitable for identifying an accelerator appropriate for a certain cement – in this case the consistency of the cement paste can be adjusted via the paste's water content – and on the other hand for comparing different cements with one or various accelerators – in this case the water-cement value of the cement paste has to be kept constant and the consistency adjusted by means of plasticisers.

The method possesses a sensitivity in the region of 0.5 M.-% of accelerator (Fig. 2).

### Laboratory Spraying Stand

A lab spraying stand was set up for testing the early strength development of wet shotcrete. Towards this end the following general conditions had to be taken into consideration:

- Processing of concretes that were as genuine as possible (especially maximum grain)
- uniform concrete and accelerator delivery to the spraying nozzle
- controlled surrounding conditions.

0,5 M.-% Beschleuniger auf (Bild 2).

### Laborspritzstand

Für die Prüfung der Frühfestigkeitsentwicklung von Nassspritzbeton wurde ein Laborspritzstand eingerichtet. Hierbei mussten folgende Randbedingungen berücksichtigt werden

- Verarbeitung von möglichst realen Betonen (insbesondere Größtkorn)
- gleichmäßige Beton- und Beschleuniger-Förderung zur Spritzdüse
- kontrollierte Umgebungsbedingungen.

Gelöst werden konnte diese Aufgabenstellung mit einer Schneckenpumpe von Putzmeister für die Förderung des Betons. Um ein Erwärmen des Betons durch Reibung des Pumpenrotors der Schnecke zu vermeiden, wird der Schneckenmantel wassergekühlt. Mit Hilfe einer Membranpumpe wird der alkalifreie Beschleuniger 2 m vor der Betondüse in den Pressluftschlauch gedrückt. Die Druckluft reißt den Beton hinter der Düse auf und bewirkt wie auf der Baustelle eine gute Durchmischung von Beschleuniger und Beton.

Da Schneckenpumpen einen höheren Feinstoffgehalt des Betons als großtechnische Kolbenpumpen erfordern, können in der Praxis übliche Betonzusammensetzungen im Labor nicht 1:1 übernommen werden. Dennoch kann das in der Praxis übliche Größtkorn von 8 mm mit der Schneckenpumpe verarbeitet werden, wenn der Mehlkorngelalt der Betonzusammensetzung ausreichend hoch gewählt wird. Deshalb hatte der erste im Labor verwendete spritzbare Beton (M1) einen Zementgehalt von 450 kg/m<sup>3</sup> und einen Kalksteinmehlgehalt von 150 kg/m<sup>3</sup>. Durch den ursprünglich gewählten sehr niedrigen Wasser-

zementwert von  $w/z = 0,45$  war bei dieser Mischung ein relativ hoher Fließmittelgehalt (FM) notwendig.

Da Baustellenspritzbetone üblicherweise Zementgehalte von 360 bis 400 kg/m<sup>3</sup> aufweisen und der Wasserzementwert in der Regel zwischen 0,48 und 0,50 liegt, wurde bei der Mischung M2 der Wasserzementwert auf  $w/z = 0,50$  angehoben. Darüber hinaus konnte durch die Substitution des Kalksteinmehls durch Steinkohlenflugasche unter gleichzeitiger Anrechnung der Flugasche auf den Wassergehalt der Zementgehalt auf 400 kg/m<sup>3</sup> reduziert werden (M3, M4).

Während Betonzusammensetzung M1 sich lediglich für die gezielte Spritzementwicklung eignet, sind – wie Bild 3 und Bild 4 zeigen – die Ergebnisse, die mit allen anderen Betonzusammensetzungen (M2 bis M4) erzielt werden, sehr gut mit Praxisergebnissen vergleichbar.

Praxisversuche im Tunnel haben gezeigt, dass das Erhärtungsverhalten des Spritzbetons auch wesentlich von der Lagerungstemperatur abhängt. Je geringer die Lagerungstemperaturen sind, desto später setzt die Hydratation des Zementes ein und desto langsamer ist die Erhärtungsgeschwindigkeit. Spritzbetone, die bei hohen Umgebungstemperaturen eine sehr gute Festigkeitsentwicklung aufweisen, können daher bei niedrigen Umgebungstemperaturen eine nicht ausreichende Festigkeitsentwicklung zeigen.

Um sicherzustellen, dass ein Spritzbetonzement auch bei tiefen Temperaturen die notwendige Festigkeitsentwicklung aufweist, werden im Laborspritzbetonversuch zwei Spritzbetonkisten hergestellt, von denen eine 24 h bei 10 °C und eine 24 h bei 20 °C gelagert wird (Bild 5). An beiden Kisten wird mit den baustellenüblichen



5 Spritzbetonstand zur Ermittlung der Spritzbetonfestigkeitsentwicklung

5 Shotcrete stand to establish the shotcrete strength development

This problem complex was solved by using a Putzmeister spiral pump for delivering the concrete. In order to avoid the concrete heating up as a result of friction from the pump's rotor, the spiral jacket is cooled with water. With the aid of a membrane pump the non-alkaline accelerator is pressed into the concrete air hose 2 m from the concrete nozzle. The compressed air agitates the concrete behind the nozzle and mixes the accelerator and concrete thoroughly just like on site.

As spiral pumps require a higher fine material content of the concrete than large-scale piston pumps, the concrete compositions that are common in practice cannot be taken over 1:1 in the lab. Nonetheless the 8 mm maximum grain that is customary in practice can be processed with the spiral pump providing that the ultrafines content of the concrete composition is selected high enough. As a result the first sprayable concrete (M1) used in the lab possessed a cement content of 450 kg/m<sup>3</sup> and a limestone powder content of 150 kg/m<sup>3</sup>. Due to the originally selected extremely low water-cement value of  $w/c = 0,45$  a rel-

atively high plasticiser content (FM) was necessary.

As shotcretes used on site normally possess cement contents of 360 to 400 kg/m<sup>3</sup> and the water-cement value generally lies between 0,48 and 0,50, the water-cement value was raised to  $w/c = 0,50$  for the M2 mix. In addition the cement content could be reduced to 400 kg/m<sup>3</sup> (M3, M4) by substituting coal fly ash for the limestone powder while offsetting the fly ash with the water content at the same time.

Whereas concrete composition M1 is merely suitable for targeted sprayed cement development – as Figs. 3 + 4 show – the results, which are attained with all other concrete compositions (M2 to M4), are highly comparable with findings in practice.

Practical tests in tunnels have revealed that the hardening behaviour of shotcrete largely depends on the storage temperature. The lower the storage temperatures are, the later hydration of the cement occurs and the slower is the hardening speed. Shotcretes, which possess outstanding strength development given high surrounding temperatures, can thus display an



Methoden (Betonpenetrometer und Hilti-Bolzensetzverfahren [3]) die Festigkeitsentwicklung bis zu 24 h ermittelt. Gleichzeitig wird der Temperaturverlauf mit einem Datenlogger dokumentiert.

## Einflussfaktoren auf die Nassspritzbeton-Performance

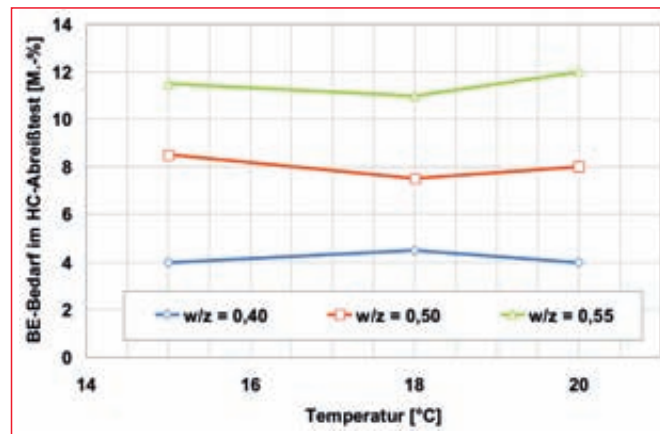
In der praktischen Anwendung gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von Nassspritzbeton: Der Beton ist sowohl betontechnologischen Parametern als auch den Umgebungsbedingungen während der Applikation ausgesetzt. Grundlegende betontechnologische Einflussfaktoren sind beispielsweise der Zementgehalt und der Wasserzementwert des Bereitstellungsgemisches sowie die Frischbetontemperatur, mit der das Bereitstellungsgemisch verarbeitet wird. Darüber hinaus ist der Spritzbeton während des Prozesses der Festigkeitsentwicklung den im Tunnel herrschenden Umgebungstemperaturen ausgesetzt. Diese können – je nach Gebirgsüberdeckung und Tunnellänge – sehr unterschiedlich sein. Besonders niedrige Temperaturen, die die Festigkeitsentwicklung negativ beeinflussen könnten, herrschen im Bereich des Tunnelanschnitts insbesondere dann, wenn ein Tunnel im Winter begonnen wird. Wie sich diese Einflussfaktoren auf die Frühfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons auswirken, wurde in unterschiedlichen Versuchen untersucht.

### Frischbetontemperatur:

Mit dem Abreißfest wurde der Einfluss der Temperatur auf das spontane Erstarren von Zementleimproben mit 15, 18 und 20 °C Leimtemperatur bei unterschiedlichen Wasserzementwerten bestimmt. Hierbei konnte keine systematische Abhängigkeit des spontanen

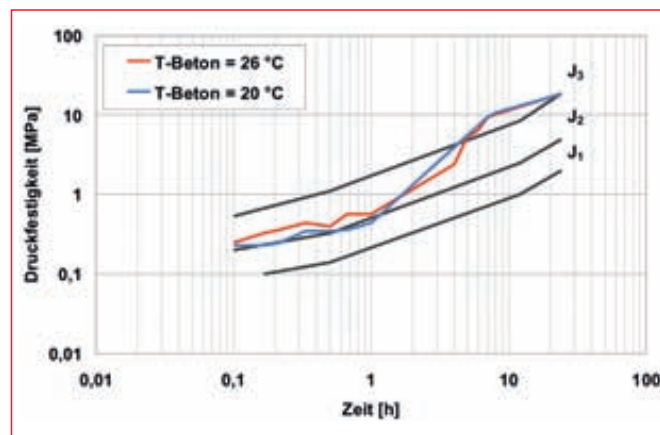
Betonrezeptur/ Concrete recipe		M1	M2	M3	M4
Zement/Cement	[kg/m <sup>3</sup> ]	450	450	400	400
Flugasche/Fly ash	[kg/m <sup>3</sup> ]	–	–	70	90
Kalksteinmehl/ Limestone powder	[kg/m <sup>3</sup> ]	150	150	–	–
Wasser/Water	[kg/m <sup>3</sup> ]	203	225	214	218
w/z / w/c	[–]	0,45	0,50	0,54	0,55
(w/z) <sub>eq</sub> / (w/c) <sub>eq</sub>	[–]	–	–	0,50	0,50
Gesteinskörnung D <sub>max</sub> / Aggregate D <sub>max</sub>	[mm]	8	8	8	8
T <sub>Beton</sub> / T <sub>concrete</sub>	[°C]	20	15–18	15–18	15–18
T <sub>Umgebung</sub> [°C] / T <sub>environment</sub> [°C]	[°C]	20	20/10	20/10	20/10
Fließmittel/Plasticiser	[M.-% v. Z.]	2	1	1,5	1,0

Tabelle 1: Spritzbetonrezepturen des Laborspritzstandes  
Table 1: Shotcrete recipes from the lab spraying stand



6 Bestimmung des Einflusses der Temperatur und des w/z-Wertes auf den BE-Bedarf von Zementleim

6 Determining the influence of the temperature and the w/c value on the accelerator requirement of cement paste



7 Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Wirkung von alkalifreiem BE

7 Influence of the fresh concrete temperature on the effect of non-alkaline accelerators

insufficient strength development given low surrounding temperatures.

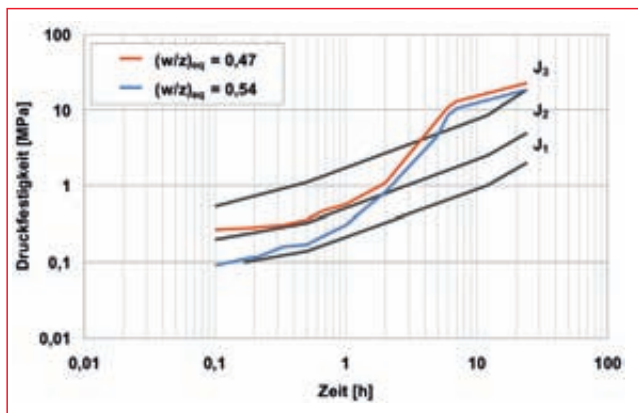
In order to ensure that a shotcrete cement also possesses the necessary strength development at low temperatures, two shotcrete forms were produced, one of which was stored 24 h at 10 °C and the other 24 h at 20 °C (Fig. 5). The strength development up to 24 h of both forms was tested using the methods normally applied on-site (concrete penetrometer and Hilti bolt setting method [3]). At the same time the temperature course is documented using a data logger.

## Factors influencing the Wet Shotcrete Performance

In practical application there are a large number of factors influencing wet shotcrete's performance. The concrete is exposed to concrete technological parameters as well as environmental conditions during application. Basic concrete technological factors having an influence are for instance the cement content and the water-cement value of the available mix as well as the fresh concrete temperature with which the mix is processed. In addition the shotcrete is exposed to the surrounding temperatures existing in the tunnel during the strength development process. These can – depending on the rock overburden and the length of tunnel – be most varied.

Especially low temperatures, which could negatively influence the strength development, prevail in the tunnel section particularly if a tunnel is started in winter. Just how these factors influence the early strength development of the shotcrete was investigated in various tests.

**Fresh concrete temperature:** the influence of the tem-



8 Einfluss des  $w/z$ -Wertes auf die Frühfestigkeitsentwicklung unter Praxisbedingungen ( $z = 380 \text{ kg/m}^3$ ,  $f = 30 \text{ kg/m}^3$ )

8 Influence of the  $w/c$  value on the early strength development under practical conditions ( $c = 380 \text{ kg/m}^3$ ,  $f = 30 \text{ kg/m}^3$ )

Erstarrens von der Leimtemperatur festgestellt werden (Bild 6). Zum Beispiel wurde an der Probe  $w/z = 0,40$  bei 15, 18 und  $20^\circ\text{C}$  ein Beschleuniger-Bedarf von 4 %, 4,5 % und 4 % ermittelt.

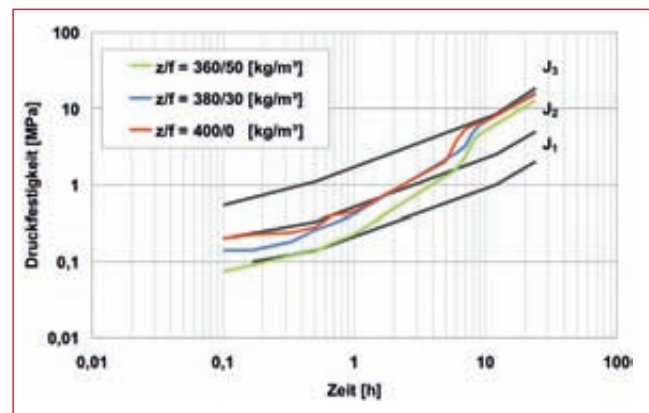
Bild 7 zeigt vergleichend die Festigkeitsentwicklung eines Betons ( $z = 360 \text{ kg/m}^3$ ,  $f = 50 \text{ kg/m}^3$ ;  $(w/z)_{\text{eq}} = 0,51$ , BE: 6 %) auf der Baustelle. Die Frischbetontemperatur betrug  $20^\circ\text{C}$  bzw.  $26^\circ\text{C}$ . Die beiden Betone hatten nach 6 min eine absolut vergleichbare Frühfestigkeit. Die weitere Festigkeitsentwicklung war bei der wärmeren Betonprobe innerhalb der ersten Stunde leicht höher. Unabhängig von diesem Ergebnis sollte bei der Herstellung des Bereitstellungsgemisches darauf geachtet werden, dieses mit einer Frischbetontemperatur von mindestens  $18^\circ\text{C}$  anzuliefern.

**Wasserzementwert:** Den Einfluss des Wasserzementwertes auf das spontane Erstarren verdeutlichen die im Abreißfest gefundenen Ergebnisse anschaulich (Bild 6): Der Beschleuniger-Bedarf eines Zementleims verdoppelt bzw. verdreifacht sich, wenn der Wasserzementwert des Leims von 0,40 auf 0,50 bzw. 0,55 angehoben wird. Die in Feld-

versuchen gemessene Frühfestigkeitsentwicklung bestätigt dieses Ergebnis: Hohe Wasserzementwerte führen zu schlechterem spontanem Erstarren als Betone mit niedrigerem Wasserzementwert (Bild 8).

**Zementgehalt:** Bild 9 zeigt die Frühfestigkeitsentwicklung von drei praxisüblichen Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichem Zementgehalt. Verwendet wurde eine nicht optimierte Zement-Beschleuniger-Kombination. Die drei Betone hatten einen konstanten äquivalenten Wasserzementwert von 0,47, jedoch durch die Flugascheanrechnung unterschiedliche Gesamtwassergehalte: Der Beton mit  $z = 400 \text{ kg/m}^3$  enthielt ca.  $10 \text{ l/m}^3$  mehr Wasser als der Beton mit  $360 \text{ kg/m}^3$  Zement, der mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement lag dazwischen. Reduzierte Zementgehalte wirken sich insbesondere negativ auf das spontane Erstarren aus. Darüber hinaus war die Frühfestigkeit des Betons mit  $z/f = 360/50$  bis in ein Alter von etwa 7 Stunden unter der der anderen beiden Betone.

**Umgebungstemperatur:** Für die Frühfestigkeitsentwicklung ist die Umgebungs- bzw. Lagerungstemperatur nicht zu vernachlässigen. Im Winter können die Temperaturen



9 Einfluss des Zementgehalts auf die Frühfestigkeitsentwicklung bei konstantem äquivalentem  $w/z$ -Wert ( $(w/z)_{\text{eq}} = 0,47$ )

9 Influence of the cement content on the early strength development given constant equivalent  $w/c$  value ( $(w/c)_{\text{eq}} = 0,47$ )

perature on the spontaneous setting of cement paste samples with paste temperatures of 15, 18 and  $20^\circ\text{C}$  was ascertained given different water-cement values using the pull-off test. In this connection no systematic dependence of the spontaneous setting of the paste temperature could be established (Fig. 6). For example an accelerator requirement of 4, 4,5 and 4 % was determined for the sample  $w/c = 0,40$  at 15, 18 and  $20^\circ\text{C}$ .

Fig. 7 comparatively shows the strength development of a concrete ( $c = 360 \text{ kg/m}^3$ ,  $f = 50 \text{ kg/m}^3$ ;  $(w/c)_{\text{eq}} = 0,51$ , accelerator: 6 %) on-site. The fresh concrete temperature amounted to 20 and  $26^\circ\text{C}$  respectively. The two concretes possessed an absolutely comparable strength after 6 min. The further strength development was slightly higher in the case of the hotter concrete sample during the first hour. Independent of this result it should be observed during the production of the ready mix that this is supplied with a fresh concrete temperature of at least  $18^\circ\text{C}$ .

**Water-cement value:** the influence of the water-cement value on spontaneous setting lucidly displays the results obtained during the pull-off test (Fig. 6): the accelerator require-

ment of a cement paste doubles or even triples if the water-cement value of the paste is raised from 0,40 to 0,50 or 0,55. The early strength development measured in field tests confirms this result: high water-cement values lead to poorer spontaneous solidification than for concretes with lower water-cement values (Fig. 8).

**Cement content:** Fig. 9 displays the early strength development of three concrete compositions normally used in practice with varying cement contents. A cement-accelerator composition that had not been optimised was used. The three concretes possessed a constant equivalent water-cement value of 0,47, however different overall water contents when taking the fly ash into account. The concrete with  $c = 400 \text{ kg/m}^3$  contained roughly  $10 \text{ l/m}^3$  more water than the concrete with  $360 \text{ kg/m}^3$  of cement, the one with  $380 \text{ kg/m}^3$  of cement lay in between. Reduced cement contents exert a particularly negative effect on spontaneous solidification. Furthermore the early strength of the concrete with  $c/f = 360/50$  lay below that of the other two concretes up to an age of roughly 7 h.

**Surrounding temperature:** the surrounding or storage



durchaus unter 10 °C liegen. Bild 10 vergleicht die Festigkeitsentwicklung eines Spritzbetons im Laborversuch mit der, die im Tunnel bestimmt wurde. Die Rezeptur im Feldversuch hatte einen um 50 kg/m<sup>3</sup> geringeren Zementgehalt und einen leicht höheren w/z-Wert. Der Zement war gezielt dahingehend modifiziert worden, dass er bei einer Beschleuniger-Dosierung von 6 M.-% bezogen auf den Zement ein optimales spontanes Erstarrungsverhalten aufweist. Das ermittelte Erstarrungsverhalten und die Festigkeitsentwicklung in Labor und Praxis innerhalb der ersten Stunde sind gut miteinander vergleichbar. Während jedoch beim Laborbeton, der bei 20 °C gelagert wurde, nach etwa 2 Stunden die Zementhydratation einsetzte und damit die Betonfestigkeit kontinuierlich zunahm, zeigte der bei 10 °C im Tunnel gelagerte Beton nach 10 Stunden noch keine wesentliche Festigkeitszunahme. Die Messung der Temperaturentwicklung des bei 10 °C im Tunnel gelagerten Spritzbetons ergab, dass die Beton-temperatur bis etwa 30 min nach dem Spritzen ansteigt. Jedoch kühlt der Beton anschließend bedingt durch die niedrige Umgebungstemperatur kontinuierlich ab, was in diesem Fall zu einem verzögerten Einsetzen der Hydratation und damit zu einer verzögerten Festigkeitsentwicklung des Betons führte. Neben dem optimierten spontanen Erstarren darf bei einer Systemoptimierung deshalb die weitere Festigkeitsentwicklung bei niedrigen Lagerungstemperaturen nicht aus den Augen verloren werden.

### Optimaler Nassspritzement

Die Erkenntnisse aus den Abreißtestprüfungen und den

Laborspritzversuchen nutzte HeidelbergCement für die Entwicklung eines optimierten Zements für den Einsatz in Nassspritzbeton. Wie Bild 11 zeigt konnte durch die gezielt durchgeführte Optimierung das Erstarrungsverhalten des Spritzbetons bei einer Beschleuniger-Dosierung von 5,5 M.-% v. Z. vom J<sub>1</sub>- in den J<sub>2</sub>-Bereich, aber auch die Frühfestigkeitsentwicklung bis 5 Stunden angehoben werden, ohne die Festigkeitsentwicklung ab 6 Stunden negativ zu beeinflussen. Bei der Zementoptimierung wurde das relativ hohe Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Zementes von 1,1 % nicht verändert.

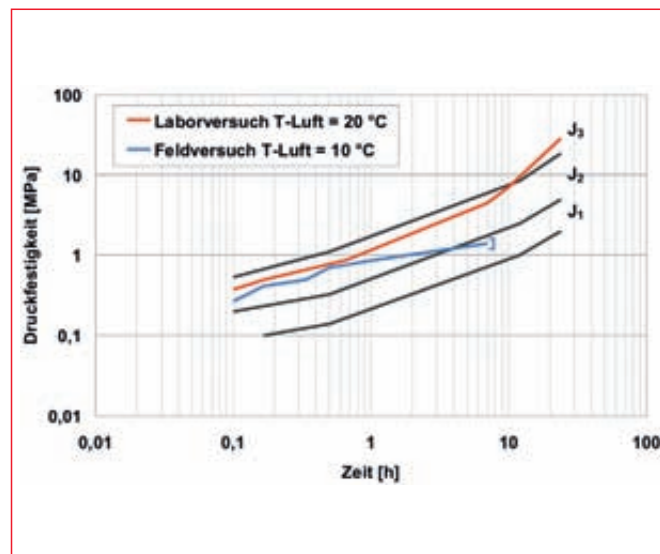
temperature must not be neglected for the early strength development. In winter the temperatures can often lie below 10 °C. Fig. 10 compares the strength development of a shotcrete in the lab test with that, which was determined in the tunnel. In the field test the concrete recipe contained approx. 50 kg/m<sup>3</sup> more cement and the w/c-ratio was slightly higher. The cement was deliberately modified in such a way that it possesses an optimal setting behaviour given an accelerator dosage of 6 M.-% related to the cement. The established setting behaviour and the strength development on the lab and in practice within the first hour are comparable with

of the shotcrete stored in the tunnel at 10 °C showed that the concrete temperature increases until some 30 min after spraying. However then the concrete continues to cool down owing to the low surrounding temperature, which in this case leads to a delay in the onset of hydration and in turn to delayed strength development of the concrete. Consequently for system optimisation, the further strength development must not be disregarded given low storage temperatures quite apart from optimised spontaneous solidification.

### Optimal Wet Sprayed Cement

The findings from the pull-off tests and lab spraying tests were used by HeidelbergCement for developing an optimised cement for application in wet shotcrete. As Fig. 11 shows through accomplishing optimisation of the solidification behaviour of the shotcrete given an accelerator dosage of 5.5 M.-% of cement, it was moved from the J<sub>1</sub> to the J<sub>2</sub> sector in addition to the early strength development of up to 5 h without negatively influencing the strength development as from 6 h. While optimising the cement the relatively high Na<sub>2</sub>O equivalent of the cement amounting to 1.1 was not altered.

Apart from the extremely good spontaneous setting of the cement given a low non-alkaline accelerator requirement, it also possesses the potential to attain continuous strength development even given low storage temperatures for the young shotcrete. As the comparison of the temperature development of the comparative sprayed forms stored at 10 and 20 °C (Fig. 12) indicates, hydration of both samples begins at almost the same time.

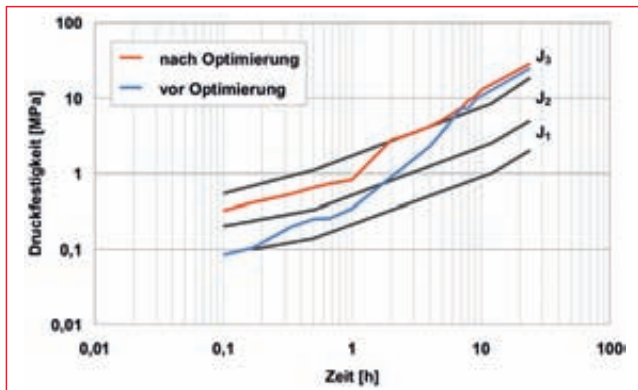


10 Einfluss der Lagerungstemperatur auf die Festigkeitsentwicklung in Labor und Praxis

10 Influence of the storage temperature on the strength development in lab and practice

Neben dem sehr guten spontanen Erstarren bei geringem alkalifreien Beschleuniger-Bedarf hat der Zement das Potenzial, auch bei niedrigen Lagerungstemperaturen eine kontinuierliche Festigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons zu erzielen. Wie der Vergleich der Temperaturentwicklung der bei 10 °C und 20 °C vergleichend gelager-

one another. However although in the case of the lab concrete, which was stored at 20 °C, cement hydration occurred after roughly 2 h and thus the concrete strength increased continuously, the concrete stored at 10 °C in the tunnel failed to display any substantial increase in strength after 10 h. Measuring the temperature development



11 Frühfestigkeitsentwicklung vor und nach Spritzzementoptimierung [CEM I 52,5 N (sb)], hergestellt mit 15 °C Frischbetontemperatur und 5,5 % Beschleuniger

11 Early strength development before and after sprayed cement optimisation [CEM I 52.5 (sb)], produced at 15 °C fresh concrete temperature and with 5.5 % accelerator


ten Spritzkisten belegt (Bild 12), setzt die Hydratation beider Proben zur etwa gleichen Zeit ein.

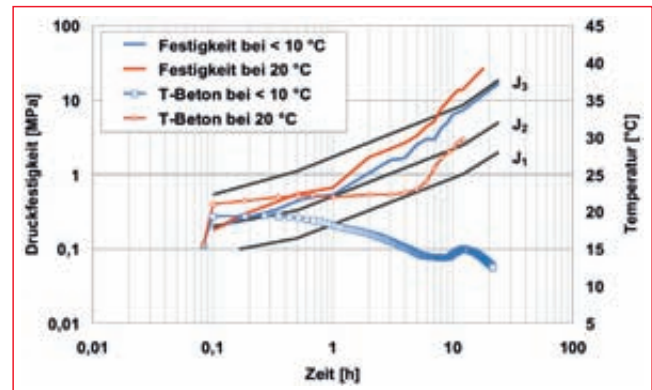
## Zusammenfassung

Die Beschleunigung des Erstarrens und der Erhärtung von Nassspritzbeton erfolgt heute aufgrund großer Vorteile auf dem Gebiet der Arbeitshygiene/-sicherheit fast ausschließlich durch alkalifreie Beschleuniger. Die Wirksamkeit dieser Beschleuniger unterscheidet sich prinzipiell von der alkalihaltiger Beschleuniger und zeigt zudem eine starke Zementabhängigkeit. Da Spritzbetonversuche an Baustellen aufwändig sind, wurden bei HeidelbergCement Testverfahren entwickelt, mit denen die Beschleunigerwirksamkeit reproduzierbar am Leim und die beschleunigte Festigkeitsentwicklung direkt am Laborbeton bestimmt werden können.

Mit den Verfahren konnte festgestellt werden, dass die Beschleunigerwirkung unabhängig von der Frischbetontemperatur ist. Demgegenüber steigt der Bedarf an alkalifreiem Beschleuniger deutlich mit steigendem Wasserzementwert sowie abnehmendem Zementge-

halt. Die Untersuchungen ergaben zudem, dass die Umgebungstemperatur die Festigkeitsentwicklung erheblich beeinflussen kann. Das Auskühlen des Spritzbetons bei winterlichen Temperaturen kann zu einem verzögerten Einsetzen der Hydratation und damit zu einer verzögerten Festigkeitsentwicklung führen.

Mit den Erkenntnissen der umfangreichen Laboruntersuchungen entwickelte HeidelbergCement einen optimierten Spritzzement. Dieser weist bei geringem Bedarf an alkalifreiem Beschleuniger ein sehr gutes spontanes Erstarren auf. Darüber hinaus entwickelt der mit diesem Zement hergestellte Beton selbst bei niedrigen Außentemperaturen kontinuierlich die erforderlichen Festigkeiten. Die Ergebnisse der Laborversuche konnten in Praxisversuchen verifiziert werden. 



12 Frühfestigkeits- und Temperaturentwicklung des optimierten Spritzzements [CEM I 52,5 N (sb)], hergestellt mit 15 °C Frischbetontemperatur und gelagert bei 10 °C und 20 °C


12 Early strength and temperature development of the optimised sprayed cement [CEM I 52.5 (sb)], produced at 15 °C fresh concrete temperature and stored at 10 and 20 °C

## Summary

The acceleration of solidification and hardening of wet shotcrete nowadays takes place practically only using non-alkaline accelerators thanks to huge advantages they offer in the field of industrial hygiene and safety. The efficacy of these accelerators differs essentially from accelerators containing alkalis and furthermore reveals a pronounced dependence on cement. As shotcrete tests on-site are costly, a test method was devised by Heidelberg-Cement by means of which the accelerator efficacy can be reproduced on the paste and the accelerated strength development directly ascertained with the lab concrete.

Using this method it could be determined that the acceleration effect acts independent of the fresh concrete temperature. On the other hand the need for non-alkaline accelerator in-

creases considerably as the water-cement value grows together with decreasing cement content. Furthermore the investigations revealed that the surrounding temperature can substantially influence the strength development. The cooling down of the shotcrete given winter temperatures can lead to a delay in the occurrence of hydration and in turn to a delayed strength development.

Thanks to the recognitions gained from these extensive laboratory investigations HeidelbergCement developed an optimised sprayed cement. This possesses extremely good spontaneous solidification while requiring a low amount of non-alkaline accelerator. In addition the concrete produced with this cement continuously develops the required strengths even given low outside temperatures. The results obtained in the lab tests could be verified in practice. 

### Literatur

- [1] DIN EN 14487: Spritzbeton, 2006-03
- [2] Boos, Peter; Wagner, Eckhard; Dienemann, Wolfgang: Shotcrete – New method for testing accelerator efficiency. Fifth International Symposium on - SPRAYED CONCRETE - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Lillehammer, Norway, 22. - 24. April 2008
- [3] Österreichischer Betonverein (ÖVBB): Richtlinie Spritzbeton, Ausgabe 7/2004
- [4] Verein deutscher Zementwerke –VdZ: Zement-Taschenbuch. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik 51. (2008)
- [5] Dörrer, H.; Löschnig, P.: Alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger – eine neue Generation von Spritzbetonbeschleunigern.
- [6] Ludwig, U.; Singh, N. B.: Effect of Temperature and Methyl Cellulose on the Hydratation of Gypsum-Hemihydrate. – In: Il cemento. – (1979) 1. – S. 39–50

# Online-Plus

[www.tunnel-online.info](http://www.tunnel-online.info)  

Im Internet finden Sie unter **[www.tunnel-online.info/heidelbergcement](http://www.tunnel-online.info/heidelbergcement)** weitere Inhalte und Informationen zu den Produkten und deren Einsatzmöglichkeiten.

On our homepage **[www.tunnel-online.info/heidelbergcement](http://www.tunnel-online.info/heidelbergcement)** you may find more content and information to the products and their possibilities in action.



Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass das Erreichen der vorgenannten Eigenschaften eine geeignete Zusammensetzung, Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung des Betons sowie eine sachgerechte, nach dem Stand der Technik durchzuführende Vorbereitung auf der Baustelle voraussetzt.

**HeidelbergCement AG**  
Entwicklung und Anwendung  
Oberklamweg 6  
69181 Leimen  
dagmar.kuechlin@heidelbergcement.com

[www.heidelbergcement.de](http://www.heidelbergcement.de)

**HEIDELBERGCEMENT**