
NASSSPRITZBETON MIT ALKALIFREIEN ERSTARRUNGSBESCHLEUNIGERN – EINE NICHT IMMER PROBLEMFREIE APPLIKATION UND DEREN AUSWIRKUNGEN

SHOTCRETE WITH ALKALIFREE ACCELERATOR – APPLICATION PROBLEMS AND THEIR EFFECTS

Dipl.-Ing. Andreas **Schaab**, HOCHTIEF Solutions AG, Consult Materials, Frankfurt
Dipl.-Ing. Michael **Knecht**, HOCHTIEF Solutions AG, Consult Materials, Frankfurt

Zur Sicherung des Ausbruchquerschnittes wird heute überwiegend Nassspritzbeton verwendet. Aufgrund seiner hohen Baustoffqualität und seiner reduzierten Gesundheitsbelastungen für das Personal kommen alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger zum Einsatz. In der Praxis konnten überwiegend gute Erfahrungen mit diesem System gesammelt werden, jedoch zeigte sich auch eine erhöhte Empfindlichkeit hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen diesen alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern und den Zementen. Anhand von Praxisbeispielen werden einige Fälle erläutert und deren Auswirkungen speziell auf die Festigkeitsentwicklung im jungen Alter gezeigt. Die Auswirkungen auf den Bauablauf und den Bauvertrag werden aufgezeigt und analysiert und Vorschläge zur Verbesserung zur Diskussion gestellt.

For the temporary support of tunnel excavations today predominantly wet-mix shotcrete is applied. Taking into account the high material quality and the reduced harmful effects on the physical health alkali-free accelerators are used. In the practical application generally good experiences have been made with this system, whereas a higher sensibility in regard of interaction effects between the alkali-free accelerators and the cement was recognized. Based on practical examples some cases will be described with special regard to the effect on the early age strength development of the shotcrete. The related impact on the time schedule and the construction contract will be analyzed and proposals for improvements will be discussed.

1. Einleitung

„Die Ablösung der Zimmerung durch Stahlausbau und Spritzbeton ist eine der größten Leistungen des Tunnelbaus“, stellte Prof. Kalman Kovári fest [1]. Bereits zu Beginn des letzten Jahrhunderts wurde für diese neuartige Sicherung der Begriff „Spritzbetonmethode“ oder „Spritzbetonbauweise“ benutzt. Diese neue Bauweise erfüllte erstmals die zentrale Forderung des Tunnelbaues nach einer räumlich und zeitlich flexiblen Kontrolle von Gebirgsdruck und Gebirgsverformung. Interessant ist, dass das ganze System der Sicherung zuerst nach dem Baustoff der Bauweise benannt wurde. Erst später haben sich teilweise auch die Namen „Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT)“ oder konventionelle Tunnelbauweise etabliert.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden nur dünne Schichten einer Betonmischung mit hoher Verdichtungsenergie auf den Untergrund aufgetragen. Es zeigte sich schon bald die

Notwendigkeit, das Verhalten des Spritzbetons im Erstarrungs- bzw. Erhärtungsverhalten zu beschleunigen. Dazu wurden anfänglich hochalkalische Erstarrungsbeschleuniger auf Basis von Wassergläsern oder alternativ Aluminatverbindungen mit Kalium oder Natrium verwendet. Heute werden in Zentraleuropa überwiegend alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger eingesetzt. Die Qualität des erhärteten Spritzbetons konnte dadurch gegenüber dem Spritzbeton mit alkalihaltigen Erstarrungsbeschleunigern deutlich gesteigert werden. Insbesondere die Gleichmäßigkeit des Spritzbetons und die Druckfestigkeit wurden stark verbessert, die Porosität spürbar reduziert. Deshalb kann Bergwasser diesen Spritzbeton weniger stark durchdringen und dabei einen deutlich geringeren Anteil Calciumhydroxid aus dem Zementstein lösen, das als Folge zu einer Versinterung der Drainageleitungen führt. Zusätzlich konnte durch die Verwendung alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger die gesundheitliche Belastung des Personals reduziert werden, weil deren Atemwege und Schleimhäute nicht mehr durch den ätzenden Sprühnebel angegriffen werden.

2. Anforderungen an den Spritzbeton

Die Anforderungen an den Spritzbeton werden neben den geltenden nationalen Normen und Richtlinien ganz wesentlich durch den Werkvertrag beschrieben. Im Werkvertrag werden sehr häufig die Anforderungen an die Eigenschaften des jungen Spritzbetons durch Vorgabe der Festigkeitsentwicklung entsprechend der Geologie bzw. des Bauverfahrens festgelegt. Hierzu werden meist die Anforderungen aus der Richtlinie des ÖBBT „Spritzbeton“ [2] und den jeweilig gültigen nationalen Normen z.B. DIN 18551 [3] herangezogen. Dort wird recht praxisnah die Druckfestigkeitsentwicklung in Frühfestigkeitsklassen eingeteilt, welche den Zeitraum der ersten 24 Stunden nach dem Auftragen beschreiben. Zusätzlich werden im Werkvertrag die weiteren Eigenschaften des Festbetons wie Druckfestigkeit, Wassereindringvermögen, Sulfatwiderstand oder aber die Versinterungsneigung festgelegt. Alle diese geforderten Eigenschaften sind vor Beginn der Bauausführung durch Eignungs- bzw. Erstprüfungen zu belegen. Hierzu sind auch Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen und Dosiermengen des Erstarrungsbeschleunigers durchzuführen. Während der Bauausführung werden die geforderten Baustoffeigenschaften baubegleitend geprüft. Die Festlegung der Prüfintervalle für diese, meist in Eigenverantwortung des Auftragnehmers durchzuführenden Konformitätsprüfungen, ist ebenfalls im Werkvertrag geregelt. Diese Prüfungen werden zusätzlich durch unabhängige Identitätsprüfungen oder Third-Party Checks kontrolliert.

All diese festgelegten Eigenschaften sind somit Teil des Werkvertrages und stellen gegenüber dem Auftraggeber ein Vertrags-soll dar, welches mindestens erreicht bzw. nicht unterschritten werden darf.

3. Bauausführung

3.1 Nicht-Erfüllung der Frühfestigkeitsanforderungen

Es zeigten sich in der Praxis alsbald auch die ersten Probleme der neuen alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger. Insbesondere wurde eine deutlich erhöhte Empfindlichkeit zwischen Bereitstellungsgemisch und Erstarrungsbeschleuniger beobachtet. Dies zeigte sich in der Notwendigkeit, zu Beginn der Baustelle eine Vielzahl von Spritzversuchen mit unterschiedlichen Erstarrungsbeschleunigern durchzuführen und dabei auch die Zemente bzw. Bindemittel des Bereitstellungsgemischs zu variieren. Mit der am besten geeigneten Kombination wird dann die Erstprüfung durchgeführt. In einigen Fällen kam es in der Vergangenheit aber während der Bauausführung zu Problemen mit der Frühfestigkeit des jungen Spritzbetons. Die Ursachen dieser Probleme werden nachfolgend anhand mehrerer unterschiedlicher Beispiele erläutert und die Auswirkungen auf den Bauablauf und Bauvertrag diskutiert.

3.1.1 Veränderungen der Zementeigenschaften; Schwankungen des C_3A -Gehaltes

Während der Bauausführung einer Tunnelbaustelle mit mehreren parallelen Tunnelvortrieben war eine stetige Erhöhung der Dosiermenge an Erstarrungsbeschleunigern notwendig, um die vertraglich geforderte Frühfestigkeit zu erreichen. Es wurden dabei zwei Erstarrungsbeschleuniger unterschiedlicher Hersteller verwendet. Das Bereitstellungsgemisch war in der Rezeptur gleich, allerdings wurde dies auf zwei verschiedenen Mischanlagen hergestellt. Nachdem sich die Dosiermenge, unabhängig vom Herstellungsort und Erstarrungsbeschleunigertyp, stetig nach oben erhöhte, wurde eine Ursachenforschung durchgeführt.

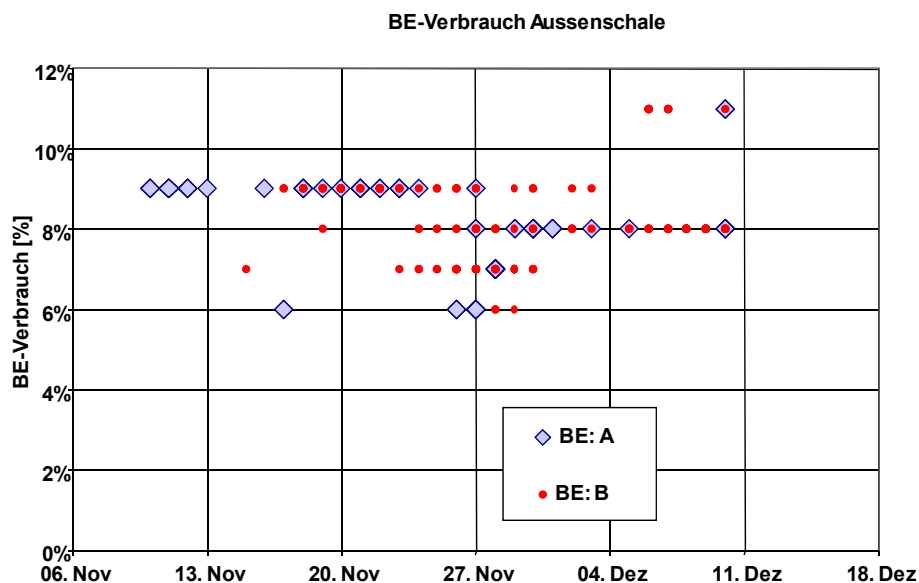


Bild 1: Dosiermenge an Erstarrungsbeschleuniger zur Erreichung der J2 Frühfestigkeit

Zuerst wurden die in der Eigenverantwortung der Baustelle liegenden Überprüfungsmaßnahmen, wie Kontrolle der Dosiereinheiten der Erstarrungsbeschleuniger und Bereitstellungsgemisch an den Spritzbüffeln durchgeführt. Im Weiteren wurden die Temperaturen des Bereitstellungsgemischs und der Erstarrungsbeschleuniger verstärkt beobachtet. Nachdem diese Maßnahmen keine spürbaren Verbesserungen zeigten, wurden die Lieferanten von Beton und Erstarrungsbeschleuniger und der Hersteller des Zementes zur Evaluation möglicher Ursachen gemeinsam zu einer Besprechung geladen. Dabei wurde, wie nicht anders zu erwarten, von allen Lieferanten und Herstellern bestätigt, dass die eigene Qualitätsüberwachung keine möglichen Hinweise auf die beobachteten Veränderungen am Spritzbeton ergaben. Deshalb wurden von der Baustelle eine vertiefte Untersuchung des Bereitstellungsgemisches, des Zementes und der Erstarrungsbeschleuniger beauftragt. Wie nachfolgende Tabelle 1 zeigt, wurde anhand einer Zementanalyse festgestellt, dass der aktuelle Gesamtgehalt an C_3A von ursprünglich ca. 10,6 % innerhalb von ca. 9 Monaten auf 7,4 % zurückging.

Betrachtet man nun die chemische Wirkung der alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger auf die frühe Hydratation des Zements, wie diese beispielsweise von Qi Xu [3] beschrieben wurde, so bestätigt sich die Veränderung des Zementes als mögliche Ursache.

Wie in Bild 2 dargestellt, werden als Hauptreaktionsprodukt zwischen Portlandzement und alkalifreiem Erstarrungsbeschleuniger raumübergreifend kurzprimatische Ettringitkristalle gebildet, die sofort die Zementklinkerkörner und Zwischenräume besetzen. Durch die Verzahnung der nadelförmigen Ettringitkristalle zeigt sich eine erste messbare Festigkeit.

Zusätzlich wird bei der Reaktion eine hohe Wassermenge verbraucht. Für diese chemische Reaktion wird ein großer Anteil des C_3A aus dem Zement gebunden. In Bild 3 wird dies exemplarisch von Qi Xu [4] anhand von Untersuchungen an einem Portlandzement dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass es gerade innerhalb der ersten Minuten zu einem prozentual hohen Abbau des C_3A -Gehaltes infolge der Reaktion mit dem Erstarrungsbeschleuniger kommt.

Tabelle 1: Zementanalyse (XRD) von drei Zementproben

	Probe 1 vom 13.01.2006	Probe 2 vom 16.10.2006	Probe 3 Spritzversuche 22.11.2006
SiO ₂	21,5	21,8	22,1
Al ₂ O ₃	7,0	6,0	6,4
Fe ₂ O ₃	2,6	2,9	2,8
CaO	59,2	60,1	60,2
MgO	4,1	3,6	3,9
SO ₃	3,3	3,3	3,3
K ₂ O	0,92	0,9	0,94
Na ₂ O	0,45	0,4	0,43
P ₂ O ₅	0,11	0,09	0,09
TiO ₂	0,33	0,31	0,32
Cl	0,03	0,03	0,03
C ₃ S	54,1	50,3	49,4
C ₂ S	10,0	12,8	13,9
c-C ₃ A	7,0	5,1	5,1
o-C ₃ A	3,6	2,5	2,3
C ₄ AF	4,6	6,7	6,6
MgO	3,0	2,4	2,3
K ₂ SO ₄	0,9	1,0	1,1
Calcit	2,1	2,0	2,1
Gips	1,1	1,1	1,0
Halbhydrat	2,0	1,6	1,5
Anhydrit	2,3	2,5	2,3
Hüttensand	12,0	12,0	12,0

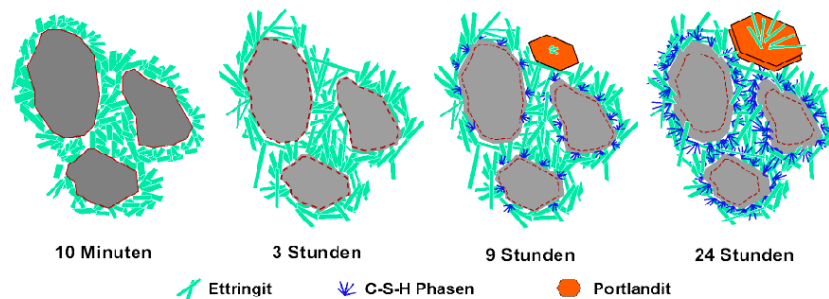
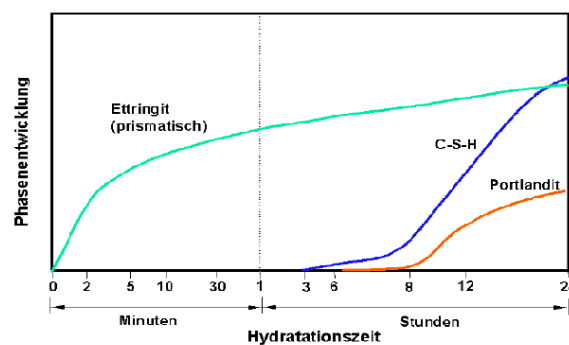


Bild 2: Schematische Darstellung des Hydratationsablaufes von Portlandzement mit alkalifreiem Erstarrungsbeschleuniger [4]

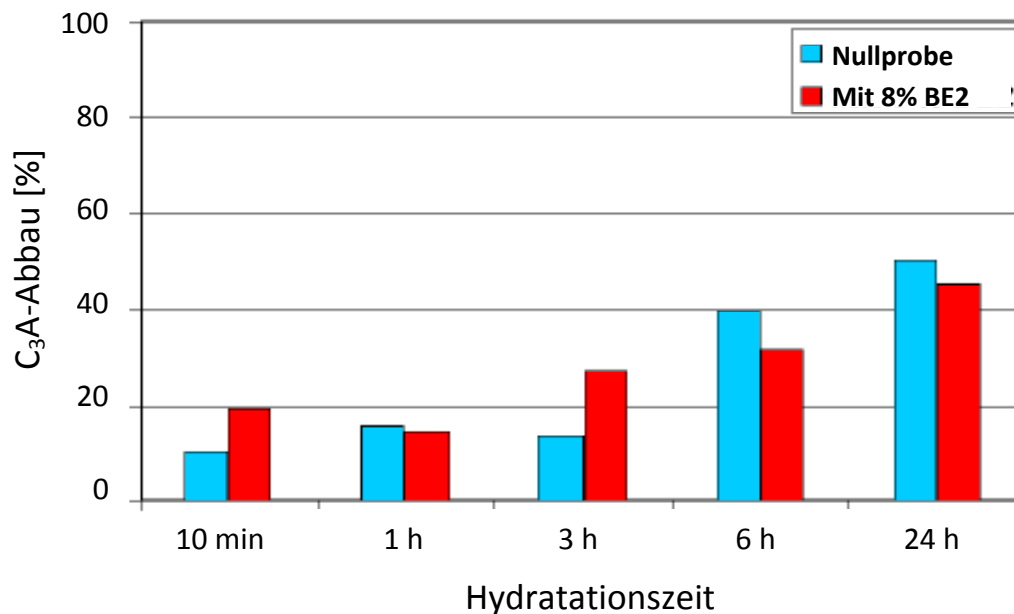


Bild 3: Zeitlicher Abbau des C_3A Gehaltes eines beschleunigten und unbeschleunigten Portlandzementes [4]

Die Veränderungen des C_3A -Gehaltes des Zementes wurden überwiegend durch veränderte Temperaturbedingungen im Drehrohrföfen verursacht. Durch Anpassungen des Brennprozesses konnte durch den Zementhersteller schnelle Abhilfe geschaffen werden. Die Frischbetoneigenschaften des Bereitstellungsgemisches und die Festbetoneigenschaften des erhärteten Spritzbetons wurden nicht negativ beeinflusst. Das Problem trat bis zum Baustellenende nicht mehr auf.

3.1.2 Veränderungen der Zementeigenschaften; Schwankungen des Sulfatträgers

In einem weiteren Fall wurden stark schwankende Eigenschaften des Spritzbetons vom Düsenführer beobachtet. Diese zeigten sich zum einen in einem teilweise sehr ungenügenden Spritzbild, speziell beim Einspritzen der Bewehrung. Es entstanden aufgrund der schnellen Reaktion zwischen Beschleuniger und Beton ausgeprägte Spritzschatten hinter der Bewehrung. Diese waren in einem extremen Fall so stark ausgeprägt, dass der Spritzbeton überwiegend auf der Bewehrungslage haften blieb und man regelrecht hinter die Bewehrung greifen konnte (Bild 4). Aufgrund der schnell wechselnden Spritzeigenschaften war es selbst für einen erfahrenen Düsenführer nicht möglich, ein gleichmäßiges Spritzbild zu erzeugen. Die zweite Schwierigkeit war das Einhalten der geforderten Frühfestigkeitsklasse J2* (J2, aber nach 12 h > 5 MPa, 24 h > 12 MPa). Durch die Reduktion der Beschleunigermenge konnte ein verbessertes, aber nicht befriedigendes Spritzbild erreicht werden, allerdings waren die Frühfestigkeiten für den Zeitraum bis ca. 3 Stunden ungenügend.

In einem anderen Fall im gleichen Zeitraum konnte der Spritzbeton gut appliziert werden, auch die Bewehrung wurde vollumfänglich eingespritzt und die Anforderungen an die Frühfestigkeit im Zeitraum bis 3 Stunden wurden eingehalten. Allerdings wurden für den Zeitraum zwischen 12 und 24 Stunden die Anforderungen der Frühfestigkeitsklasse J2* unterschritten. Der Baustelle wurde durch die Bauaufsicht ein Stopp des Vortriebs angeordnet, wenn es nicht zu deutlichen Qualitätssteigerungen kommt.



Bild 4: Spritzbetonschatten infolge zu schnellen Erstarrens des Spritzbetons.

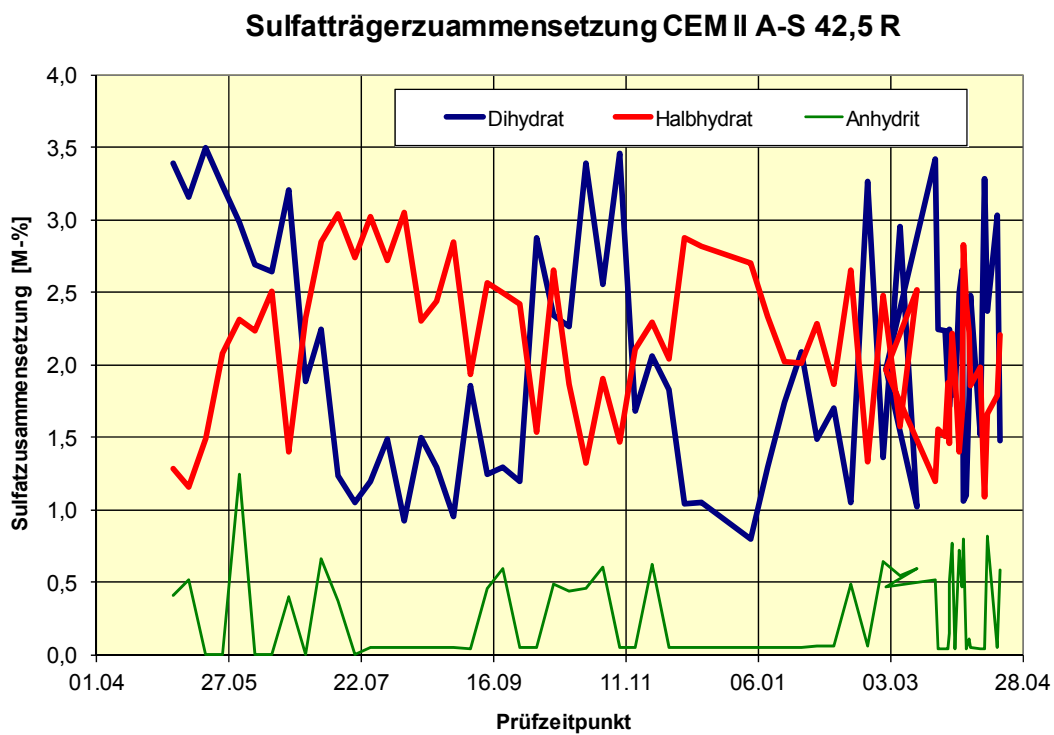


Bild 5: Veränderungen in der Zusammensetzung des Sulfatträgers des CEM II A-S 42,5 R innerhalb eines Jahres

Auch in diesem Fall waren die stark schwankenden Eigenschaften des Zementes die Ursache für die ausgeprägten Verarbeitungsprobleme. Anhand der beschriebenen und selbst beobachteten Verarbeitungsunterschiede wurde schnell der Verdacht auf eine mögliche, veränderte Zusammensetzung des sulfathaltigen Abbindereglers im Zement gelenkt. Diese Veränderungen können aufgrund unterschiedlicher Temperatur in der Zementmühle entstehen, wenn als Sulfatträger Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) verwendet wird. Dieser kann bei höheren Mühlentemperaturen zu Halbhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) entwässert werden. Dadurch wird die Lösungsgeschwindigkeit deutlich verändert. Aufgrund des schnell in Lösung gehenden Halbhydrates des Zements wird die Reaktionsgeschwindigkeit mit dem alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger (EB) zu Ettringit ebenfalls beschleunigt. Die Analyse der Zusammensetzung des Sulfatträgers mittels Röntgenfluoreszenzanalyse verschiedener Zementproben aus diesem Zeitraum bestätigte sehr deutlich diese gemachten Beobachtungen.

Die Schwankungen der Spritzbetoneigenschaften konnten anhand dieser Ergebnisse erklärt werden. Die Lösung des Problems erfolgte durch Verwendung einer anderen Zementsorte, die ausschließlich Anhydrit als Sulfatträger verwendet. Anhydrit enthält kein gebundenes Wasser und kann somit aufgrund veränderlicher Mühlentemperaturen nicht unterschiedlich entwässert werden, die Lösungsgeschwindigkeit bleibt somit unverändert.

3.1.3 Veränderungen der Zementeigenschaften; Falsches Erstarren

Das folgende Beispiel verdeutlicht die Rolle des Sulfatträgers des Zementes im Zusammenhang mit alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern. Vor Auftragsvergabe für die Lieferung des Bereitstellungsgemischs setzten sich Vertreter von Baufirmen, Betonhersteller und Zementlieferant zusammen, um eine möglichst wirtschaftliche Spritzbetonapplikation zu erreichen. Dabei wurde vom Zementhersteller betont, dass ein hoher Anteil von Anhydrit als Sulfatträger verwendet wird, um eine hohe gleichmäßige Zementqualität für den Spritzbeton sicherzustellen. Diese Argumente und die gute Performance bei den Labor- und Baustellenversuchen führten zur Wahl dieses Zementes. Anfänglich konnte die Baustelle diese guten Ergebnisse der Vorversuche bei der laufenden Qualitätskontrolle bestätigen. Allerdings zeigte sich nach einer gewissen Zeit eine spürbare Reduktion der Frühfestigkeit, gepaart mit einem höheren Wassergehalt des Bereitstellungsgemischs. Zusätzlich wurden vereinzelt Probleme beim Pumpen des Bereitstellungsgemischs beobachtet. Dies zeigte sich beispielsweise durch eine schlagartige Erhöhung des Pumpendruckes bei Anlieferung einer neuen Charge. Teilweise konnte durch ein intensives Aufmischen des Bereitstellungsgemischs der Pumpendruck etwas reduziert werden. Diese Lösung war aber nur bei ständigem Pumpen erfolgreich, bereits kurze Pumpunterbrechungen führten zu Pumpenstopfern. Eine Analyse des Problems zeigte schnell dass es sich um das Phänomen des falschen Erstarrens handelt. Mit dieser Bezeichnung benennt der Fachmann ein Überangebot an Sulfat in der Porenlösung. Dieses Sulfat besteht aus größeren plättchenartigen bzw. stabförmigen Kristallen, welche die größeren Zwischenräume überbrücken. Dadurch entsteht der Eindruck, der Zementleim sei erstarrt. Durch intensives Mischen können diese Gipskristalle teilweise zerstört werden, der Zementleim wird wieder flüssiger. Ursache für dieses falsche Erstarren war ein leicht geändertes Verhältnis der löslichen Alkalien, bei ebenfalls leicht verändertem Mischungsverhältnis von Anhydrit zu Halbhydrat. Diese relativ geringfügigen Änderungen führen insbesondere bei einem hohen Anteil von Anhydrit des Sulfatträgers bei gleichzeitig alkalireichen Zementen zu dem beschriebenen Phänomen [5]. Der hohe Anteil an Anhydrit, der ursprünglich zu gleichmäßigen Reaktionsbedingungen zwischen alkalifreiem Erstarrungsbeschleuniger und Zement beitragen sollte, führte dazu, dass die Reaktion gar nicht ermöglicht wurde, weil Beton und Beschleuniger durch die Pumpschwierigkeiten nicht gemeinsam die Düse erreichten.

3.1.4 Veränderungen der Zusammensetzung des Erstarrungsbeschleunigers

Nachdem bisher ausschließlich Beispiele mit veränderten Zementeigenschaften bzw. Zusammensetzungen beschrieben wurden, soll auch ein Beispiel für geänderte Eigenschaften des Erstarrungsbeschleunigers dargelegt werden. Aufgrund eines wesentlich exakteren Herstellungsprozesses sind chemische Betonzusatzmittel deutlich weniger von Produktionsschwankungen betroffen als beispielsweise die Zementherstellung. Die alkali-freien Erstarrungsbeschleuniger aber sind aufgrund deren chemischen Zusammensetzung nicht dauerhaft lagerstabil. Um die Lagerstabilität zu erhöhen werden sogenannte Stabilisatoren verwendet. Diese Stabilisatoren können die Spritzbetoneigenschaften ebenfalls beeinflussen. Im nachfolgenden Beispiel führte eine geringfügig höhere Dosierung eines Stabilisators zu einem deutlichen Abfall der Frühfestigkeit.

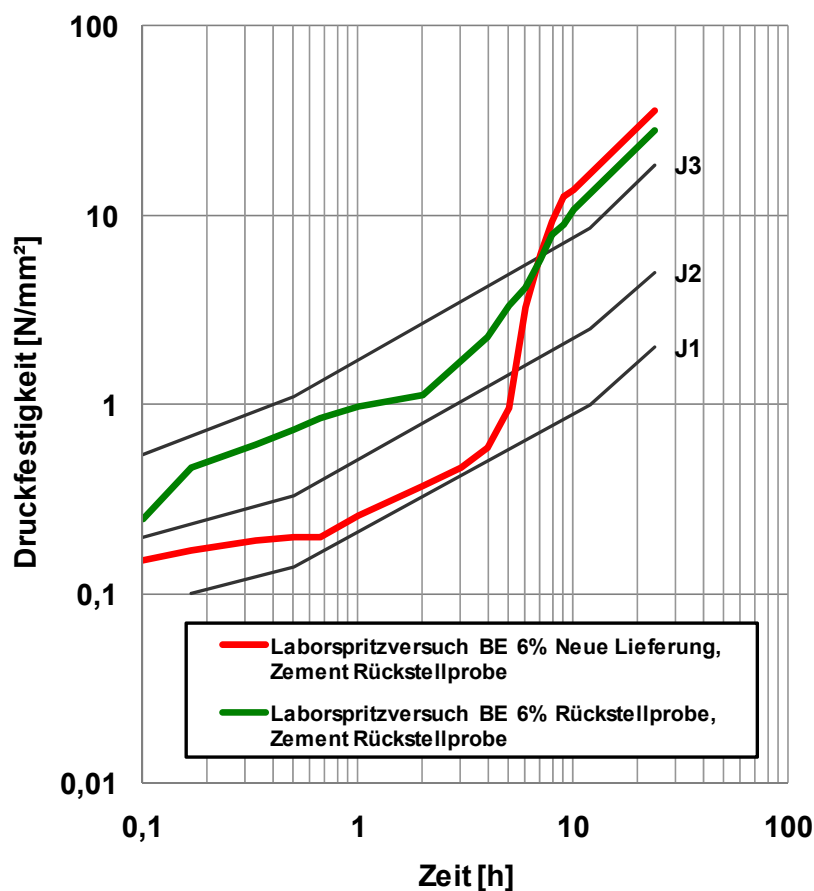


Bild 6: Entwicklung der Frühfestigkeit bei unterschiedlichen Beschleuniger-Lieferungen des gleichen Beschleunigers bei ansonsten gleichen Bedingungen

4. Diskussion der Beispiele

Die dargelegten Beispiele verdeutlichen die Problematik der Wechselwirkung der Eigenschaften von Zement und Beschleuniger. In allen Fällen wurden die jeweilig gültigen Normen für Zement DIN EN197 [6] und die Erstarrungsbeschleuniger DIN EN 934-5 [7] erfüllt. Die Ergebnisse der Frühfestigkeitsentwicklung des damit hergestellten Spritzbetons variierten teilweise stark.

Spritzbeton dient im Untertage- und Tunnelbau als erstes Sicherungsmittel und übernimmt im wörtlichen Sinn eine Funktion zur Sicherstellung der Tragwirkung. Diese Eigenschaft wird entweder im Bauvertrag oder in der Statik beschrieben und wird meist durch die Festigkeitsklasse J1 bis J3 des jungen Spritzbetons [2] ausgedrückt. Werden diese Eigenschaften nicht erfüllt, liegt im engeren Sinne eine Nichterfüllung der vertraglich zugesicherten Eigenschaften durch das ausführende Unternehmen vor. Dieses Unternehmen hat die geforderten Eigenschaften mit ausreichender Sicherheit in der Erstprüfung erfolgreich nachgewiesen. Während der Bauausführung wurde unter gleichen Bedingungen das Bereitstellungsgemisch hergestellt und auf der Baustelle erfolgte eine positive Annahmeprüfung. Dabei werden üblicherweise folgende Eigenschaften geprüft bzw. kontrolliert: Lieferschein, Rezepturnummer, Frischbetontemperatur, Konsistenz und Frischbetondichte. Ebenso wichtig ist der Verfahrensablauf mit dem Beschleuniger, auch hier wird der Lieferschein kontrolliert und Temperatur und Dichte am Verwendungsort geprüft. Das Spritzgerät ist geprüft und eingestellt und der Düsenführer ein erfahrener Fachmann. Das Ergebnis ist aber nicht immer ein Produkt mit gleichartigen, nur geringen Schwankungen unterliegenden Eigenschaften, sondern es können sich - zumindest zeitlich beschränkt - große Eigenschaftsunterschiede einstellen, die große Auswirkungen auf den Baufortschritt, den Ausbauwiderstand oder die Tragwirkung des ausgebrochenen Tunnelquerschnittes haben können. Diese Auswirkungen sind mit hohen technischen und terminlichen Risiken verbunden und verursachen dadurch fast immer hohe Kosten. In den aufgezeigten Fällen wurden teilweise hohe Schadenssummen errechnet, in einigen Fällen wurde durch die Bauaufsicht des Auftraggebers mit der Einstellung der Arbeiten gedroht.

5. Diskussion von Lösungsansätzen

Die Beispiele zeigen, ein gezielter qualitätskontrollierter Prozess bei der Herstellung von Nassspritzbeton durch alkalifreie Beschleuniger ist zurzeit nicht in allen Fällen gegeben. Der branchenübliche, arbeitsteilige Prozess erschwert nicht nur technisch, sondern auch vertraglich eine Lösungsfindung, weil die Produktverantwortung von Zement und Beschleuniger beim Hersteller des jeweiligen Produktes liegt und diese häufig keine unmittelbare vertragliche Beziehung haben. Beide Hersteller produzieren nach den jeweiligen gültigen Stoffnormen und meistens nach eigenen strengeren Qualitätsanforderungen. Dabei müssen sie auch die Wirtschaftlichkeit des eigenen Herstellungsprozesses berücksichtigen. Die eigentliche Verfahrensnorm zur Herstellung von Nassspritzbeton regelt eine Vielzahl von Verfahrensschritten durch Prüfungen. Jedoch fehlen für die beiden direkten Reaktionspartner Zement und Erstarrungsbeschleuniger ausreichend sichere Grenzwerte für die Zusammensetzung bzw. deren Schwankungsbreite für einzelne wichtige Stoffparameter. Dies liegt unter anderem an der Historie der Verfahrensnorm aus der Zeit mit den damals verwendeten alkalihaltigen Erstarrungsbeschleunigern, die im System weniger empfindlich reagierten. Aber auch die gestiegenen Qualitätsanforderungen und die immer kürzeren Bauzeiten erfordern höhere Standards, die auch zu dokumentieren sind.

In der Vergangenheit hat es bereits mehrfache Versuche gegeben, die Vergabe des Betonlieferungsvertrages mit dem des Liefervertrages für den Erstarrungsbeschleuniger vertraglich zu koppeln. Dadurch sollte primär das Risiko des Beschleunigerverbrauches reduziert werden, indem man dieses z.B. an den Betonlieferanten weitergibt. Dieser stellt dann sicher, dass die beiden Reaktionspartner Zement und Beschleuniger und deren Temperaturen optimal aufeinander abgestimmt sind. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass die optimierte Abstimmung, wenn überhaupt, nur das finanzielle Risiko des Beschleunigerverbrauches begrenzt, weil eine echte Optimierung der beiden Reaktionspartner nicht stattfand. Die technischen Auswirkungen von unterschiedlichen Beschleunigermengen auf die Frühfestigkeit im Zeitraum bis ca. 6 Stunden und im Zeitraum zwischen 12 und 24 Stunden zeigt

immer wieder, dass häufig durch eine Mehrdosierung von Beschleuniger die Frühfestigkeit im ersten Zeitraum gesteigert werden kann, dadurch aber die Festigkeit im zweiten Zeitraum spürbar abfällt. Auch können in diesem Vertragsmodell die unterschiedlichen Interessen der Prozessbeteiligten aufgrund ihrer Verantwortlichkeiten nicht ausreichend berücksichtigt werden. So führten häufige Diskussionen über die Ursache von Beschleunigerverbrauch, z.B. infolge unterschiedlicher Geologie bzw. Feuchtigkeit der Ortsbrust oder Unachtsamkeit des Unternehmerpersonals dazu, dass dieses Vertragsmodell keine Anwendung findet.

Letztendlich stellt sich die Frage, ob eine zusätzliche Stoffnorm für Zement für Nassspritzbeton mit engeren Grenzwerten bzw. Schwankungsbreiten einzelner Parameter zu einer für alle befriedigenden Lösung führen würde. Dabei wäre zu klären, welche Parameter enger geregelt werden und wie die Schwankungsbreiten dieser Parameter festgelegt werden sollten. Auch müssten für die praxismgerechte Umsetzung geeignete Prüfverfahren entwickelt werden, die diese wesentlichen Eigenschaften im Sinne einer Annahmeproofung auf der Baustelle schnell und aussagefähig überprüfen können. Hierzu sind primär gemeinsame Anstrengungen der Zement- und Zusatzmittelindustrie und der am Normungsprozess beteiligten Verbände inklusive der Forschung an Hochschulen und Universitäten notwendig. Die Prüfverfahren und deren Prüfkriterien sollten dann in der Verfahrensnorm Verankerung finden.

6. Zusammenfassung

Nassspritzbeton ist das wichtigste Sicherungsmittel des modernen Tunnelbaues. Durch die Entwicklung alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger konnte die Qualität des erhärteten Spritzbetons deutlich gesteigert werden. Dies zeigt sich im Wesentlichen in einer höheren Druckfestigkeit und in einer geringeren Porosität, die wiederum das Auslaugen von Calciumcarbonat und damit die Versinterungsneigung von Drainagen reduziert. Gleichzeitig wurden die Arbeitsbedingungen an der Einbaustelle durch eine reduzierte gesundheitliche Belastung verbessert. Diese positiven Eigenschaften werden durch eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen von Zementeigenschaften erkauft. Anhand von Beispielen wurde gezeigt, wie sich diese Systemempfindlichkeit im Baustellenbetrieb auswirkt. In allen Fällen war der Zeitraum des jungen Spritzbetons bis zu einem Alter von 24 Stunden betroffen, weil die geforderten Frühfestigkeiten zeitweise nicht sicher erreicht wurden. In der Analyse der Probleme ist auffällig, dass alle relevanten Stoff- bzw. Ausführungsnormen eingehalten werden und dabei trotzdem die meist vertraglich geforderten Frühfestigkeiten nicht erfüllt werden. Diese im Bauwesen ungewöhnliche Diskrepanz wurde im Kontext des Bauablaufes und des Bauvertrages erörtert und mögliche Lösungsansätze diskutiert.

7. Literatur

- [1] Kovári, K.:
Geschichte der Spritzbetonbauweise; Tunnel 1/2002.
- [2] Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik:
Richtlinie Spritzbeton. Wien, Ausgabe Dezember 2009.
- [3] DIN 18551:
Spritzbeton – Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN und Regel für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen. Normungsausschuss Nabau im DIN, 2010-02.
- [4] Xu, Qi:
Chemische Wirkung von Erstarrungsbeschleunigern auf die frühe Hydratation des Portlandzements. Dissertation an der Bauhausuniversität Weimar, 2005; ISBN 3-86537-421-2,
<http://dnb.ddb.de>

- [5] Locher, F.H.; Richartz, W.; Sprung, S.:
Erstarren von Zement- Teil II: Einfluss des Calciumsulfatzusatzes. Zement – Kalk – Gips, 33
1980, Seite 271-277.
- [6] DIN EN 197-1:
Zement-Teil1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
Normungsausschuss Nabau im DIN, 2011.
- [7] DIN EN 934-5:
Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Teil 5: Zusatzmittel für Spritzbeton –
Definitionen, Anforderungen, Konformität Kennzeichnung und Beschriftung. Normungsausschuss
Nabau im DIN, 2005.

Zu den Autoren

Dipl.-Ing. Andreas Schaab

Studium des Bauingenieurwesens an der FH Wiesbaden; HOCHTIEF Consult Materials, Versuchshalle Walldorf. Aufgabengebiete: Entwicklung von Baustoffen, Bau- und Prüfverfahren; Betreuung internationaler Großprojekte in allen baustofftechnologischen Belangen.

andreas.schaab@hochtief.de

Dipl.-Ing. Michael Knecht

Studium des Bauingenieurwesens an der FH Karlsruhe, Laborleitung Readymix/Cemex AG Mannheim; Prüfstellenleitung Betonprüfstelle Knecht; Regionale Prüfstellenleitung HOCHTIEF Consult Materials

michael.knecht@hochtief.de