

Klaus Eichler

Erfahrungen mit Nassspritzbeton J3

Dr. tech. Klaus Eichler

Lafarge Permooser AG,
Mannersdorf



Bild 1: Ulmenvortrieb im Wienerwaldtunnel mit Nassspritzbeton
Fotos & Grafiken: © Lafarge Permooser, Klaus Eichler

Einleitung

Beim Auffahren von unterirdischen Hohlräumen ist nach dem Ausbruch der Spritzbeton als Erstsicherung zu einem unverzichtbaren Baustoff geworden. In Verbindung mit Ankern, Stahlbögen und Bewehrungsmatten ist Spritzbeton als integrierter Bestandteil der Philosophie der „Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode“ (NÖT) zu sehen. In dieser Betrachtungsweise wird vielerorts auch von der Spritzbetonbauweise gesprochen. Dabei muss der Spritzbeton schnelle und hohe Frühfestigkeiten aufweisen, es müssen zielsicher geforderte Endfestigkeiten erreicht werden und darüber hinaus werden Anforderungen an dichte Gefüge, an hohe Widerstandsfähigkeit, Dauerhaftigkeit u. a. gestellt.

Die letzten ca. 20 Jahre der modernen Spritzbetontechnologie waren von erfreulichen Entwicklungen im Hinblick bautechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften gekennzeichnet.

Ohne ins Detail zu gehen, sind beim **Trockenspritzverfahren** als Innovationen im Bereich der **Verfahrenstechnologie** die Druckbehältertechnik und die Ringraumdüse und im Bereich der **Bindemitteltechnologie** die Spritzbetonzemente/-bindemittel zu nennen. Beim **Nassspritzverfahren** sind im Bereich der **Verfahrenstechnologie** die Optimierung der Spritzarm-/Spritzdüsenteknik sowie die Implementierung baustellentauglicher Elektronik und im Bereich der **Bindemitteltechnologie** die flüssigen alkalifreien Beschleuniger besonders hervorzuheben.

Bedingt durch die Forderung nach umweltverträglichen Baustoffen, Bauverfahren und Bauwerken, gepaart mit immer größeren Tunnelquerschnitten und Tunnellängen (u. a. Wienerwaldtunnel vgl. Bild 1) haben sich für das Nassspritzverfahren durch die Entwicklung stabiler, flüssiger alkalifreier Beschleuniger neue Einsatzmöglichkeiten – insbesondere bei schwierigen geologischen Verhältnissen – ergeben.

Waren die Anforderungen J3 an den jungen Spritzbeton in der Vergangenheit nur dem Trockenspritzverfahren vorbehalten, so gibt es mittlerweile auch baupraktische Erfahrungen von Nassspritzbeton bzgl. der Anforderung J3 (u. a. vom Tunnel Steinhaus [Abbildung 1/Tabelle 1]).

Verfahrenstechnologie

Die Spritzbetonbauweise bietet mehr Möglichkeiten zur Mechanisierung als viele andere Bauverfahren. Die Maschinenpalette der Baumaschinenindustrie reicht von der Spritzmaschine mit manueller Beschickung und Düsenführung bis hin zum Spritzautomaten und Spritzroboter. Durch variable Leistungspakete können Förder- und Spritzleistung den jeweiligen Baustellen-Verhältnissen wirtschaftlich angepasst werden.

Man unterscheidet Spritzmaschinen nach dem Trocken- und Nassspritzverfahren sowie der Dünn- oder Dichtstromförderung. Beim Trockenspritzverfahren wird ein Bereitstellungsgemisch (Trockenbeton oder Trockenmörtel) durch eine Spritzmaschine der Förderleitung zugeführt und im Dünnstrom mit

Abbildung 1: Festigkeitsverlauf Tunnel Steinhaus

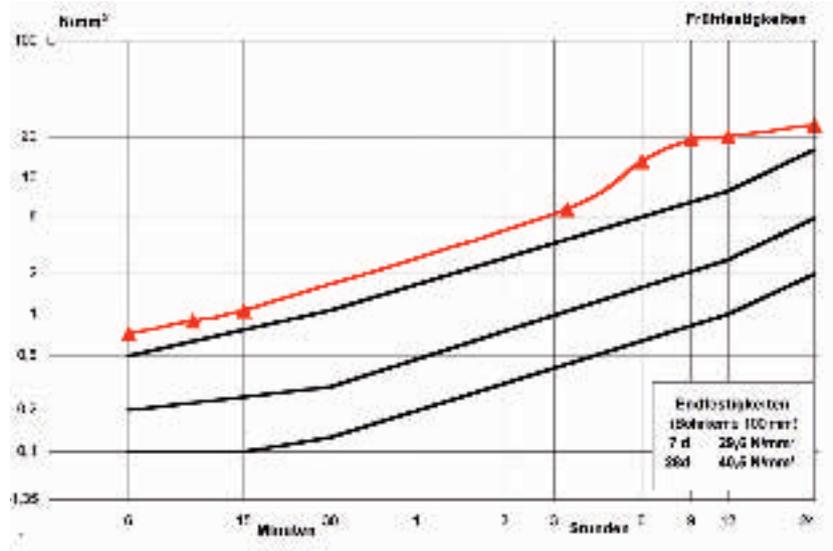


Tabelle 1: Mischungsentwurf Nassspritzbeton J3

| | |
|---------------------|------------|
| CEMI 52,5 R | 400 kg/m³ |
| CEM II/A – S 42,5 R | 100 kg/m³ |
| Rundkorn 0/4 | 1088 kg/m³ |
| Rundkorn 4/8 | 396 kg/m³ |
| W/Z | 0,4 0 |
| FM | 0,5 % |
| LP | 0,1 % |
| BEAF | 9,0 % |

Druckluft zur Spritzdüse gefördert, in der die notwendige Wassermenge und ggf. flüssige Additive zugegeben werden. Beim Nassspritzverfahren wird Frischbeton oder Frischmörtel (i. d. R. in einem Mischwerk hergestellt) im Allgemeinen im Dichtstrom mit einer Pumpe zur Spritzdüse gefördert, in der ggf. flüssige Additive zugegeben werden und durch Einleitung von Druckluft die notwendige Materialbeschleunigung erreicht wird.

Nassspritzverfahren

Maschinentechnik

Zwar ist beim Nassspritzverfahren eine Dünnstromförderung technisch denkbar und möglich, doch ist die Anwendung eher selten. Üblich ist beim Nassspritzverfahren

die Dichtstromförderung. Hier kommen klassische Kolbenpumpen oder Pumpen mit Schneckenförderung zum Einsatz. Die Betonpumpen mit Schneckenförderung weisen ein absolut kontinuierliches und pulsationsfreies Förderverhalten auf (PM-Betojet). Bei den Kolbenpumpen handelt es sich i. d. R. um Doppelkolbenpumpen, die im Vergleich zu herkömmlichen Kolbenpumpen geringere Umschaltphasen der Rohrweichen aufweisen und somit einen fast kontinuierlichen Förderstrom haben (Schwing, Putzmeister). Eine Optimierung stellt dabei die Meyco Suprema (Bild 2) dar, deren Pulsation des Fördergutes elektronisch durch das hydraulische PushOver-System gesteuert wird, wodurch eine gleich bleibende Beschleunigerzugabemenge pro Frischbetonförderstrom möglich ist (siehe Bild 2, Abbildung rechts).

Düsenteknik

Beim Nassspritzverfahren im Dichtstrom wird an der Düse durch Druckluft das Material vom Dichtstrom in den Dünnstrom überführt und gleichzeitig der flüssige Beschleuniger zugesetzt. Konstruktive Unterschiede bei den Nassspritzdüsen ergeben sich bei der Einbringung der Druckluft und des Beschleunigers.

Die Zugabe der Druckluft erfolgt entweder in der Düse in den dichten Betonstrom (Turboinjektordüse Top Shot, Schwing) oder aber am Umfang der Düse (Betojet-Düse, PM). Bei der Beschleunigerzugabe sind gute Erfahrungen mit auf den Düsenkörper aufgesetzten Verlängerungsschläuchen von bis zu 6 m gemacht worden. Dem Betondichtstrom wird im Düsenkörper das Druckluft-Beschleuniger-Gemisch zugegeben, der

Bild 2 : Meyco Suprema [1]

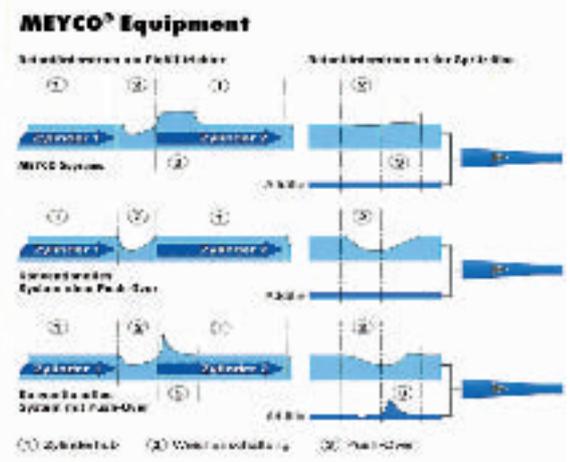


Abbildung 2: Eigenschaften verschiedener Fließmittelrohstoffe [2]

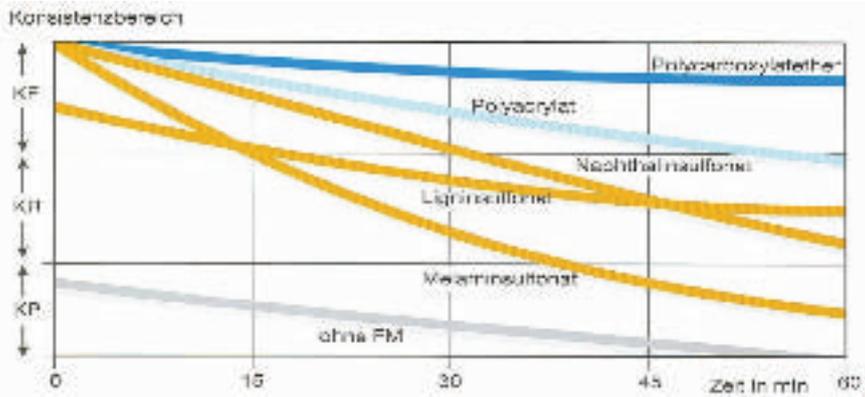
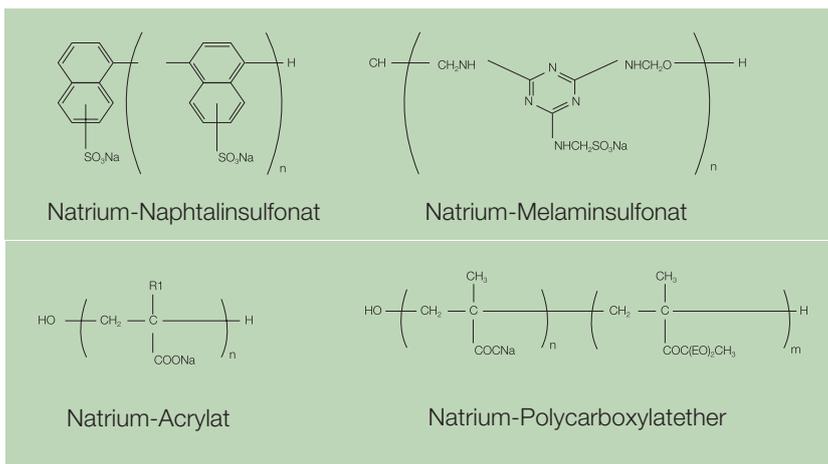


Abbildung 3: Bausteine der wichtigsten Fließmittel [3]



Frischbetonstrom wird dabei aufgerissen und im Dünnstrom durch den Verlängerungsschlauch gefördert.

Spritzroboter/Spritzmobile

Spritzroboter/-manipulatoren oder Spritzmobile eignen sich dort, wo große Volumen von Spritzbeton eingebaut werden, d. h. vornehmlich im Stollen- und Tunnelbau sowie in der Hang- und Baugrubensicherung (je nach Größe und Kubatur). Aufgrund mechanisierter und automatisierter Ausrüstung können auch große Mengen von Spritzbeton – nass oder trocken – unter stets optimalen Bedingungen ohne Ermüdung des Düsenführers aufgebracht werden. Gleichzeitig werden die Arbeitsbedingungen verbessert und die Sicherheitsstandards erhöht. Die Spritzlanze lässt alle für den Spritzbetrieb möglichen und notwendigen Düsen-

bewegungen zu – sie ist auf dem Trägerarm, der in alle Richtungen bewegt und durch eine eingebaute Extension verlängert werden kann, befestigt. Die Steuerung erfolgt über eine tragbare Fernbedienung.

Bindemitteltechnologie

Unter der Bindemitteltechnologie wird hier das Zusammenwirken von Erstarrungsbeschleuniger und Zement sowie der daraus resultierenden Erstarrungs- und Erhärtungskinetik nebst deren Beeinflussung verstanden. Um die Wirkungsweisen der neu entwickelten alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger und deren Auswirkungen auf die Spritzbetoneigenschaften besser darstellen zu können, werden vorab einige Grundlagen aus den komplexen Vorgängen, die bislang nur grob erforscht sind, beschrieben.

Zusatzmittel

Bestimmte Spritzbetoneigenschaften (Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten, Pumpfähigkeit u. a.) können durch Zusatzmittel gezielt verändert werden. Dabei können Materialeigenschaften des Frisch- oder Festbetons und/oder verfahrensbedingte Eigenschaften des Herstellungs- bzw. Förderprozesses im Interesse der Beeinflussung liegen.

Fließmittel

Für das zielsichere Erreichen bestimmter physikalischer und chemischer Eigenschaften des Frisch- und Festbetons, insbesondere bei Anwendung des Nassspritzverfahrens, ist die Verwendung so genannter wasserreduzierender Zusatzmittel (Fließmittel) unabdingbar. Fließmittel sind polymere Moleküle mit einer negativen Ladungsdichte am Polymer. Die Bausteine dieser Makromoleküle können sehr unterschiedlich sein. Chemisch gesehen sind diese Fließmittelrohstoffe wasserlösliche organische Polyelektrolyte, die zur Kategorie der polymeren Dispergiemittel gezählt werden können. Als Rohstoffe spielen in der modernen Biontechnologie Ligninsulfonate, Naphthalinsulfonate, Melaminsulfonate, Polyacrylate und seit wenigen Jahren diverse Polycarboxylatverbindungen eine Rolle (Abb. 2).

Die Molekülstruktur bzw. die Bausteine der wichtigsten Fließmitteltypen zeigt Abb. 3.

Beschleuniger

Primär kommen beim Spritzbeton im Tunnelvortrieb, unabhängig vom Spritzverfahren, i. A. Erstarrungsbeschleuniger (BE) zum Einsatz; daneben gibt es Erhärtungsbeschleuniger, die die Entwicklung der Frühfestigkeit von Beton beschleunigen, mit oder ohne Einfluss auf die Erstarrungszeit.

Mit Ausnahme von Trockenbeton, bei dem bereits ein pulverförmiger BE im Bereitstellungsgemisch untergemischt sein kann, kommen flüssige BE-Mittel zum Einsatz. Vor Verwendung der Produkte im Vortrieb ist in jedem Fall unter Baustellenbedingungen eine Eignungsprüfung durchzuführen, um die Eigenschaften und Wirkungsweise zu erfahren. Als Wirkstoffe der Erstarrungsbe-

schleuniger werden i. d. R. wasserlösliche Salze der Alkalimetalle verwendet; am bekanntesten sind die Chloride, Silikate, Carbonate und Aluminate (vgl. Tabelle 2).

Bindemittel

Grundsätzlich können alle genormten sowie alle bauaufsichtlich zugelassenen Zemente verwendet werden. Bedingt durch die gestellten Anforderungen, z. B. im Felshohlraum- und Bergbau bei Wasserandrang, schlechtem Gebirge und Einwirkung von Sprengerschütterungen auf jungen Beton, sind besonders schnell erstarrende und erhärtende Bindemittelvarianten gefragt – aus diesem Grund kommen i. A. die Zementarten CEM I bzw. CEM II zum Einsatz [4].

Portlandzement besteht primär aus den vier Klinkerphasen [5]

| | | |
|---|-----------------------|-----------|
| Tricalciumsilikat | | |
| $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_3S | 45–80 M % |
| Dicalciumsilikat | | |
| $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_2S | 0–32 M % |
| Tricalciumaluminat | | |
| $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A | 7–15 M % |
| Tetracalciumaluminatferrit | | |
| $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF | 4–14 M % |
| sowie Calciumsulfat | | |
| CaSO_4 | | 3–4,5 M % |

als Erstarrungsregler. Durch die Wahl und Optimierung des Sulfatträgers kann erreicht werden, dass ein Zement – in Abhängigkeit

seiner Klinkerkinetik – gleichmäßig und zuverlässig mit allen Beschleunigertypen reagiert, unabhängig vom Spritzverfahren.

Hydratation von Portlandzement

Die Hydratation von Portlandzement beruht auf einem komplexen System von chemischen Reaktionen zwischen den einzelnen Klinkerphasen und dem Anmachwasser. Die dabei sofort mit dem Wasser reagierende Oberflächenschicht der einzelnen Zementkörner verwandelt diese in eine gesättigte bis übersättigte Kalkhydratlösung mit einem pH-Wert über 12, aus der dann Hydratationsprodukte auskristallisieren [6; 7].

Die teilweise gleichzeitig und teilweise aufeinander folgend ablaufende Umwandlung des Klinkers in Hydrate erschwert genaue Studien der stattfindenden Reaktionen, weshalb vielfach die Hydratation an den einzelnen Klinkerphasen untersucht wird. Dabei zeigt sich jedoch, dass die Ergebnisse nicht direkt auf die Hydratation von Zement übertragen werden können, weil die chemische Zusammensetzung der einzelnen Hydratationsprodukte und die Struktur durch eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Komponenten gestört werden [8; 9].

Die Hydratationsgeschwindigkeiten der Klinkerphasen lassen sich qualitativ wie folgt ordnen: $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$ wobei das C_3A bzgl. des Erstarrens und C_3S bzgl. des Erhärtens jeweils eine Schlüsselfunktion einnehmen.

Hydratation der Aluminatphasen

Tricalciumaluminat bildet mit Wasser Calciumaluminathydrat (CAH). In Anwesenheit von Calciumsulfat und Wasser reagiert ein Teil des Tricalciumaluminats sofort und bildet in sulfatreichen Lösungen den metastabilen, hexagonal säulenförmigen bis nadelförmigen Ettringit ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$). Die Ettringitbildung dauert so lange, bis die Sulfatkonzentration nicht mehr ausreicht. Nach [10] werden dabei die Ettringithüllen um die Tricalciumaluminat durch den entstehenden Kristallisationsdruck von Zeit zu Zeit aufgesprengt, wobei diese Oberflächenabrüche so lange durch neue Ettringitbildung abgedichtet werden, bis eben die Sulfatkonzentration nicht mehr zur Ettringitbildung ausreicht (Ende der Verarbeitbarkeit).

Sulfat als Erstarrungsregler

Wie bereits erwähnt, ist Sulfat bei der Hydratation von Portlandzement beteiligt. Lässt man es weg, kann das erstarrungsregelnde Tricalciumaluminat C_3A kein Ettringit bilden, sondern reagiert unter Aufnahme von Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu großen, tafelförmigen Kristallen, dem Tetracalciumaluminathydrat C_4AH_{13} . Dieses wird in der Folge in das stabile Tricalciumaluminathexahydrat C_3AH_6 überführt. Dabei werden die sich noch in Lösung befindlichen Ca^{2+} Ionen vom C_3A sofort abgefangen und damit aus dem chemischen Gleichgewicht entfernt.

Tabelle 2: Wirkstoffbasen von Beschleunigern

| Wirkstoffbasis | Na2O-Äquivalent (M%) | pH-Wert | Kennzeichnung |
|---------------------------|----------------------|-------------|---------------------|
| Kalium-Aluminat | 20,00 - 22,00 | 13,0 - 14,0 | |
| Kalium-Natrium-Aluminat | 17,00 - 19,00 | 13,0 - 14,0 | irrezend |
| Natrium-Aluminat | ca. 15,00 | 13,0 - 14,0 | |
| Wasserglas (Na-, K-) | ca. 12,00 | 11,0 - 12,0 | reizend/ätzend |
| Polymervergütete Silicate | ca. 8,00 | 10,0 - 11,0 | reizend |
| Aluminiumoxid/hydroxid | | | |
| Aluminiumsulfat | < 1,00 | 3,0 - 6,0 | keine Kennzeichnung |
| Aluminiumformiat | | | |

Die Folge ist eine gegenseitige Beschleunigung der Hydratationsreaktionen der Aluminat- und Silicatphasen (Löffelbinderprinzip s. o.). Aus diesem Grund wird den Klinkerphasen Sulfat in Form von Anhydrit (CaSO_4), Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) und/oder Halbhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) zugesetzt; die Zugabemenge ist abhängig von der Tricalciumaluminatmenge, der Verarbeitungstemperatur und der Mahlfineinheit, d. h. je höher bzw. feiner die vorgenannten Einflussgrößen, desto höher muss der Sulfatzusatz sein.

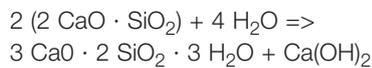
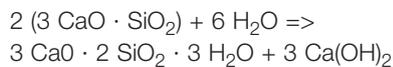
Betrachten wir den Normalfall, d. h. ein ausgewogenes Verhältnis von $\text{C}_3\text{A}/\text{SO}_3$, dann bildet das C_3A mit dem Sulfat eine nadel-förmige Ettringithülle um das C_3A -Korn; dies bedeutet, dass weiteres Wasser eben nur durch Diffusion durch die „Hülle“ zum C_3A -Korn gelangen kann.

In der Folge entstehen durch den Innendruck Aufbrüche in der „Hülle“, durch die weiterer Wasserzutritt möglich ist. Dabei wird, je nach Gleichgewichtszustand, weiteres Ettringit oder aber auch sofort das stabile Monosulfat $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ gebildet. Durch die Bildung von Monosulfat werden 2SO_3 frei, wodurch C_3A selbstständig weiteres Monosulfat bildet; dieser Prozess dauert bis zur Erschöpfung von SO_3 . Danach bildet das noch vorhandene C_3A mit dem noch vorhandenen Wasser die Calciumaluminathydrate CAH.

Ist das Verhältnis zwischen C_3A und SO_3 nicht ausgewogen, d. h. ist der Sulfatgehalt zu hoch oder zu niedrig, entsteht vorzeitiges Ansteifen oder Erstarren. Bei zu niedrigem Sulfatgehalt entstehen neben dem nadel-förmigen Ettringit auf der Oberfläche des Zementkorns auch tafelförmiges Monosulfat und/oder CAH-Phasen, was zu einem raschen Erstarren führt. Bei zu hohem Sulfatgehalt ergibt sich durch die Bildung von längsprismatischem Ettringit ebenfalls ein schnelles Erstarren; zusätzlich besteht die Gefahr der späteren Sekundärgipsbildung.

Hydratation der Calciumsilikate

Bei der Hydratation der beiden Calciumsilikate C_3S und C_2S werden nadel- oder leistenförmige, wahrscheinlich aus aufgerollten Folien bestehende Calciumsilikathydrate (CSH), die kalkärmer als die wasserfreien Ausgangsprodukte sind, und Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gebildet, das eine gesättigte bis übersättigte Calciumhydroxidlösung bewirkt.



Dabei unterscheiden sich die beiden Klinkerphasen in der Reaktionsgeschwindigkeit, wobei C_3S schneller und C_2S langsamer reagiert und in der Menge des abgespaltenen Calciumhydroxid, während die Zusammensetzung des Calciumsilikathydrats für beide Phasen identisch ist.

Portlandzement und Beschleuniger

Neben dem Sulfatgehalt, dem Tricalciumaluminatanteil und dem Alkaligehalt üben die Mahlfineinheit, die Temperatur, der Wassergehalt u. a. weiteren Einfluss auf das Erstarren und Erhärten von Portlandzement aus.

Beschleuniger sollen ein rasches Erstarren des Spritzbetons bewirken, aber auch zu einer beschleunigten Festigkeitsentwicklung in den ersten Stunden führen, was durchaus nicht parallel verlaufen muss. Infolgedessen müssen neben den Aluminatphasen auch die Silicatphasen beschleunigt werden.

Um die Hydratationskinetik deutlich zu beschleunigen, muss die Löslichkeit der Verbindungen, die an der Ettringit-, der CAH- und CSH-Bildung beteiligt sind, beeinflusst werden; d. h. es muss Einfluss genommen werden auf die Löslichkeit von Calciumhydroxid, von Calciumsulfat und von Calciumaluminat sowie ggf. von einzeln vorhandenen Alkaliverbindungen und/oder das Angebot von Ca^{2+} , Al^{3+} , OH^- und SO_4^{2-} muss erhöht werden.

Somit lassen sich die Beschleuniger in die in Tabelle 3 aufgeführten Wirkungsweisen unterteilen [11].

Von den als Erstarrungsbeschleuniger geeigneten Wirkstoffbasen werden überwiegend Alkalialuminate allein oder in Verbindung mit Alkalicarbonaten und Alkalihydroxiden eingesetzt; seit einigen Jahren finden alkaliarme bzw. alkalifreie Wirkstoffbasen wie Aluminiumsulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) und Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$) Anwendung.

Die Erstarrungsbeschleunigung sollte ohnehin nur so weit erfolgen, als für den jeweiligen Anwendungsfall erforderlich. Jede Beschleunigung der Frühfestigkeitsentwicklung führt insbesondere bei den alkali-haltigen Produkten zu einer Verminderung der Endfestigkeit. Diese Feststellung wird dadurch erklärt, dass durch die Beschleunigung weniger langfaseriges und mehr kurzfasriges CSH gebildet wird, wodurch ein weniger dichtes Zementsteingefüge entsteht [12].

Tabelle 3: Wirkungsweise von Beschleunigern

| Gruppe | Wirkungsweise | Wirkstoffbasen | Beispiele |
|--------|--|--|---|
| 1 | Erhöhung der OH^- -Ionenkonzentration | Alkalicarbonat Alkalihydroxid | Na_2CO_3 , K_2CO_3 NaOH , KOH |
| 2 | Zusätzliche Bildung von Calciumsilikaten | Alkalisilikat | $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{K}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ |
| 3 | Bildung von Calciumsulfat und -aluminaten | Alkalisulfat Aluminiumsulfat Aluminiumhydroxid Alkalialuminat | Na_2SO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ $\text{Al}(\text{OH})_3$ NaAlO_2 , KAlO_2 |
| 4 | Erhöhung der Calciumionenkonzentration | Chlorid u. a. | CaCl_2 , NaCl |

Aluminiumhydroxid

Die Reaktionsmechanismen sind noch nicht erforscht; es wird angenommen, dass das $Al(OH)_3$ zunächst mit dem Calciumhydroxid und den Alkalien (KOH bzw. NaOH) aus dem Zement reagiert und dann in Wechselwirkung mit dem Sulfat tritt.

Nach [13] wird das im neutralen pH-Wertebereich wasserunlösliche Aluminiumhydroxid (auch Aluminiumtrihydrat $[Al(OH)_3 \cdot 6 H_2O]$ genannt) durch das frei werdende Calciumhydroxid, bedingt durch die pH-Werterhöhung, wasserlöslich. Da dieser Vorgang nicht schnell genug abläuft, muss nach [13] diesem Beschleunigertyp noch etwas Aluminiumsulfat $(Al(SO_4)_3)$ zugesetzt werden, damit eine rasche Frühfestigkeitsentwicklung eintritt. Das aufgelöste Aluminiumhydroxid reagiert dann mit Calciumhydroxid und Sulfat zu Ettringit. Derartige Beschleunigertypen setzen die Endfestigkeit des Betons nicht herab. Charakteristisch für diese Rohstoffbasis ist eine hohe Frühfestigkeitsentwicklung bis zu einem Alter von ca. 0,5 Stunden. Der weitere deutliche Festigkeitsanstieg erfolgt im Allgemeinen erst nach ca. 2–3 Stunden.

Aluminiumsulfat

Die Wirkung des Aluminiumsulfates ist erfahrungsgemäß weniger zementabhängig als die des Aluminiumhydroxides. Allerdings ist für eine befriedigende Beschleunigung eine wesentlich höhere Dosierung notwendig.

Der Unterschied der beiden aluminiumhaltigen Beschleuniger besteht offensichtlich darin, dass beim Aluminiumsulfat das Sulfat durch den Beschleuniger selbst ins System gebracht wird und die Art und Menge des Abbindereglers im Zement nur von sekundärer Bedeutung ist. Es wird vermutet, dass der beschleunigende Effekt beim Aluminiumsulfat in der Bildung von großen Ettringitmengen beruht, die nicht nur die Kornoberfläche der Klinkerkörner bedecken, sondern auch die Zwischenräume zwischen den Körnern ausfüllen. Hierfür sind entsprechende Mengen an Aluminiumsulfat notwendig, was der Grund für die Notwendigkeit einer höheren Dosierung sein könnte. Charakteristisch ist für diese Rohstoffbasis eine kontinuierliche Festigkeitsentwicklung,

Abbildung 4: Einfluss unterschiedlichen Zuschlags auf die Frühfestigkeitsentwicklung

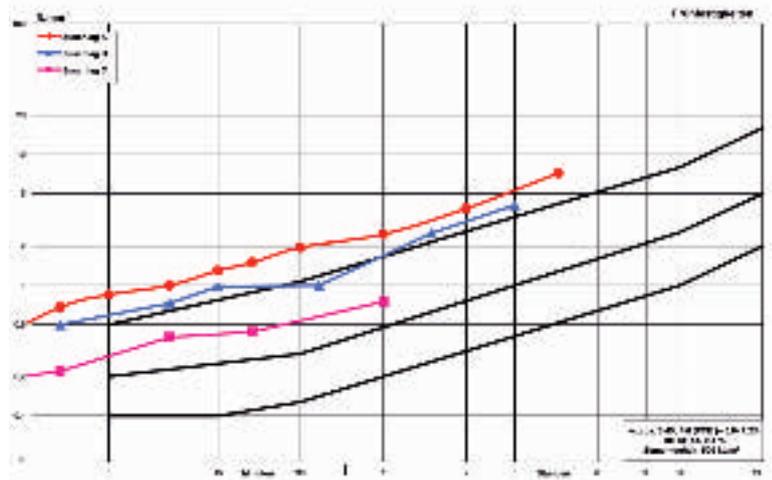


Abbildung 5: Einfluss des Zementes und des Fließmittels auf die Frühfestigkeitsentwicklung

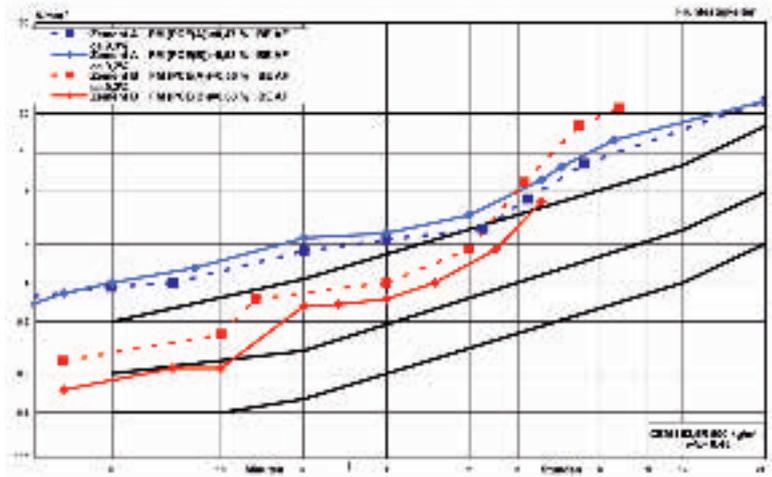


Abbildung 6: Einfluss der Zusammensetzung des Zementes bei konstantem Zementgehalt auf die Frühfestigkeitsentwicklung

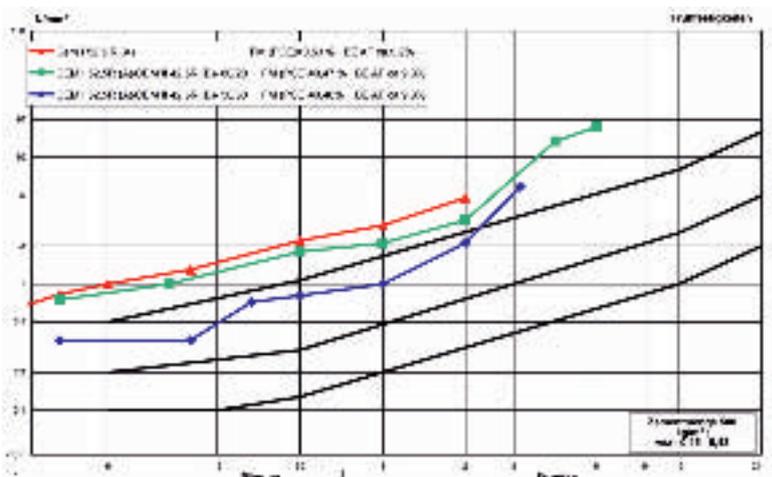


Abbildung 7: Einfluss des Zementgehaltes auf die Frühfestigkeitsentwicklung

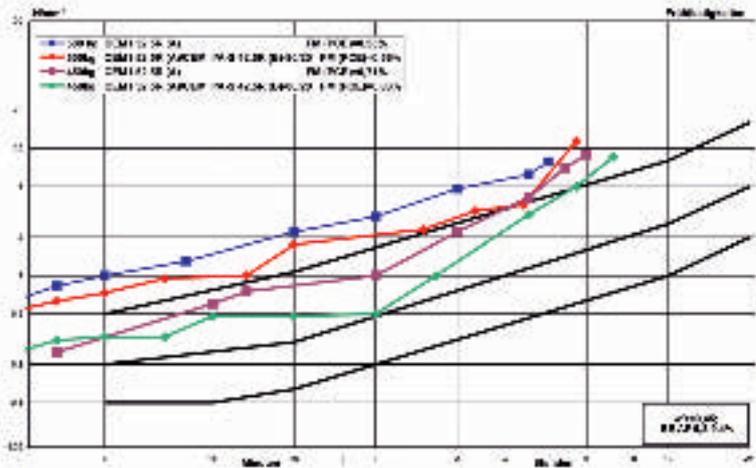


Bild 3: Zentrale Mischanlage (mixed in plant)

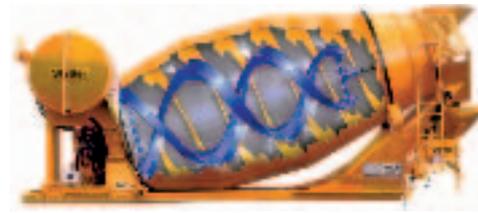


Bild 4: Das „GSM-Prinzip“ für das „mixed in car Verfahren“

insbesondere ist das typische „Plateauverhalten“ nach ca. 0,5 Stunden bis ca. 3 Stunden weniger stark ausgeprägt.

Vergleichsversuche am Prüfstand

Im Rahmen von Laborstudien/Spritzstand für den Erkundungstunnel Mitterpichling in Kärnten im Zuge des Koralmtunnels – der ca. 2,5 km lange Tunnel erfordert ebenfalls J3-Eigenschaften vom zum Einsatz kommenden Nassspritzbeton – wurden u. a. der Einfluss unterschiedlicher Zemente und -zugabemengen, der Einfluss des W/Z-Wertes nebst Fließmittel/-zugabemenge sowie der Einfluss des Zuschlages bei Verwendung eines alkalifreien Beschleunigers auf die Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Nassspritzbetons untersucht.

Einfluss unterschiedlichen Zuschlages

Im Zuge der Versuchsreihen wurde auch der Einfluss des Zuschlages auf die Festigkeitsentwicklung von Nassspritzbeton untersucht. Dabei wurde versucht, den W/Z-Wert (ca. 0,45) nahezu konstant zu halten und über die Fließmittelzugabe (PCE) eine vergleichbare Verarbeitungseigenschaft einzustellen. Ebenfalls wurden die Zementart (CEM I 52,5 R), die Zementmenge (500 kg/m³) und die Beschleunigerzugabe (BEAF, ca. 9,3 %) konstant gehalten. Ver-

wendet wurde eine Zuschlagskörnung 0/8 klassifiziert rund (A), klassifiziert gemischt körnig (B) und nicht klassifiziert gemischt körnig (C). Der Wasseranspruch nahm in der Reihenfolge AC zu, was sich dann beim gewählten konstanten W/Z-Wert im Verbrauch der notwendigen Zusatzmittelmenge zum Erzielen eines vergleichbaren Ausbreitmaßes (ca. 62 cm) widerspiegelte (bis ca. 50 % Mehrbedarf, 0,8–1,2 %). Es zeigte sich, dass nur mit den Varianten A und B zielführende Eigenschaften erzielbar sind. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt.

Einfluss des Zementes und des Fließmittels

Im Hinblick auf die unterschiedlichsten Objektstandorte wurde auch der Einfluss des Zementes (unterschiedliche Liefer- und Produktionsstandorte [A/B]) untersucht. Gleichzeitig fanden bei dieser Prüfrisserie auch zwei unterschiedliche Fließmittel (unterschiedliche Hersteller [A/B], gleiche Rohstoffbasis [PCE]) Berücksichtigung. Der W/Z-Wert (0,45), der Zementgehalt (500 kg/m³) und die Beschleunigerzugabemenge (BEAF, ca. 9,3 %) wurden konstant gehalten; bei der Verflüssigung wurde ein Ausbreitmaß von ca. 58 cm angestrebt. Die Versuche ergaben, dass der Zement aus dem Werk A sich grundsätzlich im Vergleich zum Zement aus dem Werk B besser verflüssigen lässt,

das Ergebnis aber auch vom verwendeten Fließmittel beeinflusst wird. Die Kurvenverläufe sind der Abb. 5 zu entnehmen.

Einfluss der Zusammensetzung des Zementes bei konstantem Zementgehalt

In einer weiteren Versuchsserie wurde versucht, durch geeignete Zementvarianten die Frischbetonkosten zu optimieren. Bei einer konstanten Zementmenge (500 kg/m³) und einem W/Z-Wert zwischen 0,45 und 0,48 (bedingt durch den doch sehr unterschiedlichen Wasseranspruch der Bindemittelvarianten) waren bereits deutliche Unterschiede im Bedarf der erforderlichen Fließmittelmengen zur Herstellung eines vergleichbaren Ausbreitmaßes von ca. 58 cm feststellbar. Obgleich die notwendigen Fließmittelmengen gegenläufig den zuvor erforderlichen Wasserbedarfsmengen waren, zeigte sich beim Frühfestigkeitsverhalten bei einer konstanten Beschleunigerzugabe (BEAF, ca. 9,3 %) eine klare Abhängigkeit zwischen Zementfestigkeitsklasse, dem Abmischungsverhältnis und den eigentlichen Frühfestigkeitswerten. Wie die Kurvenverläufe in Abbildung 6 zeigen, ist es durchaus möglich – in Abhängigkeit der entsprechenden Zementperformance – eine Abmischung mit einer geringeren Zementfestigkeitsklasse anzustreben.

Einfluss des Zementgehaltes

Schließlich wurde unter Beibehaltung der zuvor bereits beschriebenen Parameter (W/Z-Wert 0,45, BEAF ca. 9,3 %) versucht, eine Abhängigkeit zwischen Gesamtzementmenge und Frühfestigkeitsentwicklung aufzuzeigen. Wie die Kurvenverläufe der Abbildung 7 zeigen, erfüllen die beiden Varianten mit einem Zementgehalt von 500 kg/m³ die Anforderungen J3, während eine Frischbetonrezeptur mit einem Zementgehalt von 450 kg/m³ insbesondere die Frühfestigkeiten von J3 nicht erreichen.

Zusammenfassung

Abschließend ist festzuhalten, dass die Anforderungen J3 an den jungen Spritzbeton im Nassspritzverfahren technisch und wirtschaftlich (im Rahmen einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung eines jeden Objektes) möglich sind.

Voraussetzung aber ist, dass Bindemitteltechnologie (FM, ggf. LP-Mittel, BEAF und Zemente nebst Zusatzstoffe), Zuschlag und die zum Einsatz kommende Verfahrenstechnologie (Mixed in plant (vgl. Bild 3) oder mixed in car sowie Förder- und Dosiertechnik) aufeinander abgestimmt werden. Insbesondere bei der mobilen Frischbetonaufbereitung (mixed in car) bietet die Gegenstrommischtrommel (vgl. Bild 4) ein erhebliches Verbesserungspotenzial was eine gleich bleibende Frischbetonkonsistenz bei der Übergabe betrifft. Glück Auf!

Literatur

- [1] Melbye T.: Spritzbeton für die Felsicherung. MBT-Zürich, 12/2001
- [2] Heidelberger Bauchemie, Marke Addiment: Wirkung von Fließmitteln. Firmenprospekt, 7/2000
- [3] Hauck H. G., Qvaeschning D.: Wirkungsweisen der neuen Fließmittelgeneration. ibausil 00, Weimar, 2000
- [4] Maidl B.: Handbuch für Spritzbeton. 1992
- [5] Locher F. M.: Chemie des Zements und der Hydratationsprodukte. Zementtaschenbuch, 1979/80
- [6] Czernin W.: Zementchemie für Bauingenieure. Wiesbaden, 1977
- [7] Wischers G.: Ansteifen und Erstarren von Zement. Betontechnische Berichte, 1980/81
- [8] Taylor H. F.: The Calcium Silicates Hydrates. V. Int. Symposium on the chemistry of Cement, Tokio, 1968
- [9] Copeland L. E., Kanro D. L.: Hydratation of Portland Cement. V. Int. Symposium on the Chemistry of Cement, Tokio, 1968
- [10] Schwiete H. E., Ludwig U., Jäger P.: Einflußnahme verschiedener Sulfate auf das Erstarren und Erhärten von Zementen. ZKG, 2/68
- [11] Reul H.: Handbuch Bauchemie. Augsburg, 1991
- [12] Löschnig P.: Erstarrungsbeschleuniger für Spritzbeton. TFB, 1992
- [13] Werthmann E.: Die zwei Wege zur Abbindebeschleunigung von Spritzbeton. Tunnel, 3/95

zement ist mehr

/// Qualität

... ist unser Selbstverständnis

/// Service

... schafft Mehrwert für unsere Kunden

/// Produktvielfalt

... für jeden Einsatzbereich

... und jetzt:

Das Web Seiten aus Österreich