
Nassspritzen im Dichtstrom in Österreich

WET MIX SHOTCRETE (POSITIVE DISPLACEMENT) IN AUSTRIA

WALTER PICHLER

In Österreich wurde bis vor wenigen Jahren der Spritzbeton fast ausschließlich im Trockenspritzverfahren hergestellt. Das Nassspritzverfahren wurde nur in wenigen Ausnahmefällen (z.B. Zammer Tunnel Ostvortrieb) in großem Maßstab angewendet. Mit ein Grund für dieses Schattendasein war das Fehlen von flüssigen, alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern, sowie der im Gegensatz zum Spritzbindemittel hohe Preis.

Der erfolgreiche Einsatz des Nassspritzverfahrens am Blisadonatunnel war der Startpunkt für einen verstärkten Einsatz dieses Verfahrens in Österreich. Derzeit wird das Naßspritzverfahren auf mehr als 70 % der Tunnelbaustellen angewendet. Die Erfahrung von 2 Jahren Nassspritzverfahren in Österreich werden im Rahmen dieses Beitrags präsentiert.

Until just a few years ago almost all sprayed concrete in Austria was produced by means of the dry-mix process. The wet-mix method was only in a few exceptional cases used to any considerable degree, as in the eastern approach of the Zammer tunnel. One reason for this method's neglect was the lack of liquid, alkali-free accelerators, as well as the high price by comparison with the "spray cement" (a type of portland cement characterized by a short setting time, available in Central Europe).

The successful application of the wet-mix process in the construction of the Blisadona tunnel was the starting point for an increased use of this process in Austria. The wet-mix method is now being used on more than 70% of all tunnel sites. The experience of two years' use of the wet-mix process in Austria will be described in the course of this paper.

1. Geschichtliche Entwicklung

Das Nassspritzverfahren wurde in Österreich bis vor wenigen Jahren nur in Einzelfällen angewendet. 1992 wurden ca. 95% des Spritzbetons im

Trockenspritzverfahren hergestellt. Bis zum Ende des Jahres 2001 hat sich dieses Verhältnis zu Gunsten des Nassspritzverfahrens geändert. Im folgenden Diagramm (*Bild 1*) ist der Einsatz der unterschiedlichen Spritzbetonherstellungsverfahren für

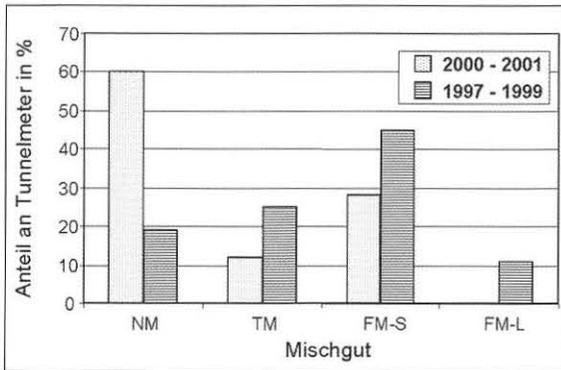


Bild 1: Verwendung der einzelnen Spritzbetonverfahren in den letzten Jahren; NM=Nassmischgut, TM=Trockenmischgut, FM*=Feuchtmischgut *S=Spritzbindemittel, L=konventionell

Verkehrstunnelbauten in den letzten Jahren dargestellt.

Das Nassspritzverfahren wurde vor dem Jahre 1997 nur in Einzelfällen angewendet. 1997 wurde am östlichen Teil des Zammer Tunnels mit Nassspritzbeton begonnen. 1999 erfolgte der Anschlag des Blisadonatunnels, bei dem erstmals im großen Umfang das Nassspritzverfahren mit flüssigem alkalifreiem Erstarrungsbeschleuniger angewendet wurde.

Die Entwicklung wurde durch einige Meilensteine beeinflusst. Einer dieser Meilensteine war das Erscheinen der neu überarbeiteten Richtlinie Spritzbeton der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik im Jahre 1998. In dieser wurden Anforderungen an die Erstarrungsbeschleuniger, insbesondere im Hinblick auf Alkaligehalt, pH-Wert und Festigkeitsabfall festgeschrieben, die eine Verbesserung der Arbeitshygiene und Spritzbetonqualität sichern sollten. Zum damaligen Zeitpunkt waren nur Produkte in Pulverform, die diese Vorgaben erfüllten, erhältlich. 1997 wurde der Spritzbeton des Ostabschnittes des Zammer Tunnels im Nassspritzverfahren hergestellt. Die hohe Qualität des hergestellten Spritzbetons, sowie die guten arbeitshygienischen Bedingungen waren zwar äußerst positiv, das Problem der Zudosierung eines pulverförmigen Erstarrungsbeschleunigers im Nassspritzverfahren trat allerdings deutlich zutage. Aufgrund dieser Problematik erfolgte anschließend kein weiterer Einsatz des Spritzverfahrens im Zusammenhang mit pulverförmigen Erstarrungsbeschleunigern. Mit einem flüssigen Erstarrungsbeschleuniger wurde beim Auffahren eines Wasserstollens der Wiener Hochquellleitung ein erster Versuch der Herstellung von Nassspritzbeton mit flüssigem alkalifreiem Erstarrungsbeschleuniger unter baupraktischen Bedingungen durchgeführt. Aufgrund zu geringer Frühfestigkeitsentwicklung wurde die Spritz-

betonherstellung auf das Trockenspritzbetonverfahren umgestellt.

Im Rahmen der Baumaßnahme "Dernbacher Tunnel" an der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main (Baubeginn 1998), bei der österreichische Baufirmen federführend beteiligt waren, konnte erstmals im deutschsprachigen Raum Nassspritzbeton in großem Umfang mit einem flüssigen alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger im Sinne der Richtlinie Spritzbeton erfolgreich hergestellt werden.

An diesen Erfahrungen aufbauend wurde 1999 für den Blisadonatunnel das Nassspritzverfahren mit alkalifreiem flüssigem Erstarrungsbeschleuniger für die gesamte Baumaßnahme verwendet. Anfängliche Probleme, die hauptsächlich auf den flächenhaften Wasserandrang an der Felsoberfläche zurückzuführen waren, konnten durch eine Modifikation am Erstarrungsbeschleuniger überwunden werden.

Aufgrund der sehr positiven Erfahrungen bei der Spritzbetonherstellung am Blisadonatunnel fiel die Entscheidung bei mehreren anschließenden Baumaßnahmen (Tunnel Kienberg, Ambergtunnel, Gräberntunnel, Herzogbertunnel, usw.) auf das Nassspritzverfahren.

2. Grund für den Aufschwung des Nassspritzverfahrens

Im Jahre 1998 wurde vom Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten (Straßenforschung) eine Bewertung der unterschiedlichen Verfahren zur Herstellung von Spritzbeton auf Basis der Vorgaben der Richtlinie Spritzbeton herausgegeben.

Darin wurden sehr hohe Kosten für den Nassspritzbeton, aufgrund des Preises für den alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger, ermittelt. Weiters wurde für das Nassspritzverfahren ein erforderliches Entwicklungspotential in Richtung flüssige Produkte festgestellt.

Die flüssigen alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger sind nun entwickelt und der Beschleunigerpreis ist gegenüber dem Zeitpunkt des Forschungsvorhabens um mehr als 50 % gesunken. Weiters wurde bei der ersten Anwendung unter den neuen Gegebenheiten im großen Maßstab (Blisadonatunnel) die baupraktische Anwendbarkeit auch unter sehr ungünstigen Umständen (flächiger Wasserandrang) nachgewiesen.

Diese Umstände haben die Attraktivität des Nassspritzverfahrens erhöht und in den Blickpunkt des Interesses gerückt.

Zement	A	B	C	D	E	F
Blainewert (cm ² /g)	4390	4420	4597	3935	3544	4690
Spez. Gewicht (g/cm ³)	2,87	2,90	3,09	3,08	3,06	2,92
Bluten (cm ³)	11	7	9	14	19	12
Erstarrungsbeginn (h:min)	2:10	1:20	2:00	2:07	2:19	1:33
Erstarrungsende (h:min)	3:10	1:90	3:09	3:15	3:41	3:41
Druckfestigkeit 1d (N/mm ²)	12,1	15,1	13,3	15,0	10,0	14,4
Druckfestigkeit 28d (N/mm ²)	45	53	50	50	45	47

Tab. 1: Physikalische Parameter der Zemente für die Spritzbetonherstellung

3. Mischgutausgangsstoffe

3.1. Zement

Verwendung finden fast ausschließlich Portlandzemente der Type CEM II A/S 42,5 R. Die Zemente entsprechen der Anforderung an TZ 2 entsprechend Richtlinie Spritzbeton. Die physikalischen Parameter der hauptsächlich Verwendung findenden Zemente sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Die günstigsten Ergebnisse wurden mit dem Zement D erzielt. Mit Ausnahme des Zementes E liegt der Blainewert im Bereich von ca. 4000 - 4700 g/cm². Die 1-Tage Druckfestigkeit bewegt sich im Bereich von 10 bis 15 N/mm² (nach ÖN B 3310) und übersteigt damit die geforderten 9 N/mm² für einen TZ 2, entsprechend der Richtlinie Spritzbeton deutlich. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen liegt im Bereich von 45 - 53 N/mm².

3.2 Erstarrungsbeschleuniger

Die Daten der hauptsächlich in Österreich verwendeten Erstarrungsbeschleuniger sind in der folgenden Tabelle 2 dargestellt:

	Produkt A	Produkt B	Rili Spritzbeton
pH-Wert	3,1	3,1	3,0 - 8,0
Dichte (g/cm ³)	1,43	1,44	-
Feststoffgehalt	52,5	50,2	-
Na ₂ O-Äquivalent	0,06	0,36	≤ 1,0 %

Tab. 2: Daten der Erstarrungsbeschleuniger

Der pH-Wert der Beschleuniger liegt knapp über der zulässigen Untergrenze von 3,0. Deutlich höhere pH-Werte sind derzeit aus Stabilitätsgründen nicht möglich. In der Tabelle 3 finden sich die Ergebnisse einer Laborprüfung der beiden Produkte bei gleicher Dosierhöhe mit einheitlichem Zement.

	Produkt A	Produkt B	RILI Spritzbeton
Erstarrungsbeginn (sec.)	80	75	-
Erstarrungsende (sec.)	200	173	-
Festigkeitsabfall (%)	9	29	max.15 %

Tab. 3: Technologische Daten der Beschleuniger mit dem Zement F

Die Prüfung des Erstarrens erfolgte entsprechend der Richtlinie Spritzbeton mit einem w/z-Wert von 0,45. Die Unterschiede im Erstarrungsbeginn sind im Rahmen der Prüfschärfe. Die Prüfung des Festigkeitsabfalls wurde im Alter von 7 Tagen und einem w/z-Wert von 0,7 durchgeführt. Beim Produkt B trat ein sehr hoher Festigkeitsabfall auf. Das Auftreten eines unzulässig hohen Festigkeitsabfalls wurde bei beiden Produkten, abhängig vom verwendeten Zement, festgestellt, wobei dieser nicht zwingend bei beiden Produkten auftrat.

3.3 Zusatzstoff

Als Zusatzstoff werden aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe entsprechend ÖN B 3309 verwendet. Zum Einsatz kommen Flugaschen oder Kombinationsprodukte. Die Verwendung von Zusatzstoffen ist nur bei sehr reaktiven Zementen sinnvoll.

3.4 Gesteinskörnungen

In der Hauptsache werden gebrochene Gesteinskörnungen verwendet. Rundkorn ist in Österreich meist nicht verfügbar. Der abschlämmbare Anteil der Gesamtsieblinie liegt im Bereich von 3 - 6 %, wobei ein Anteil um die 3 % günstiger ist im Bezug auf einen geringen Wasseranspruch. Ein höherer Anteil an Abschlämmbarem führt meist zu Problemen mit der Konsistenz bzw. dem Wassergehalt.

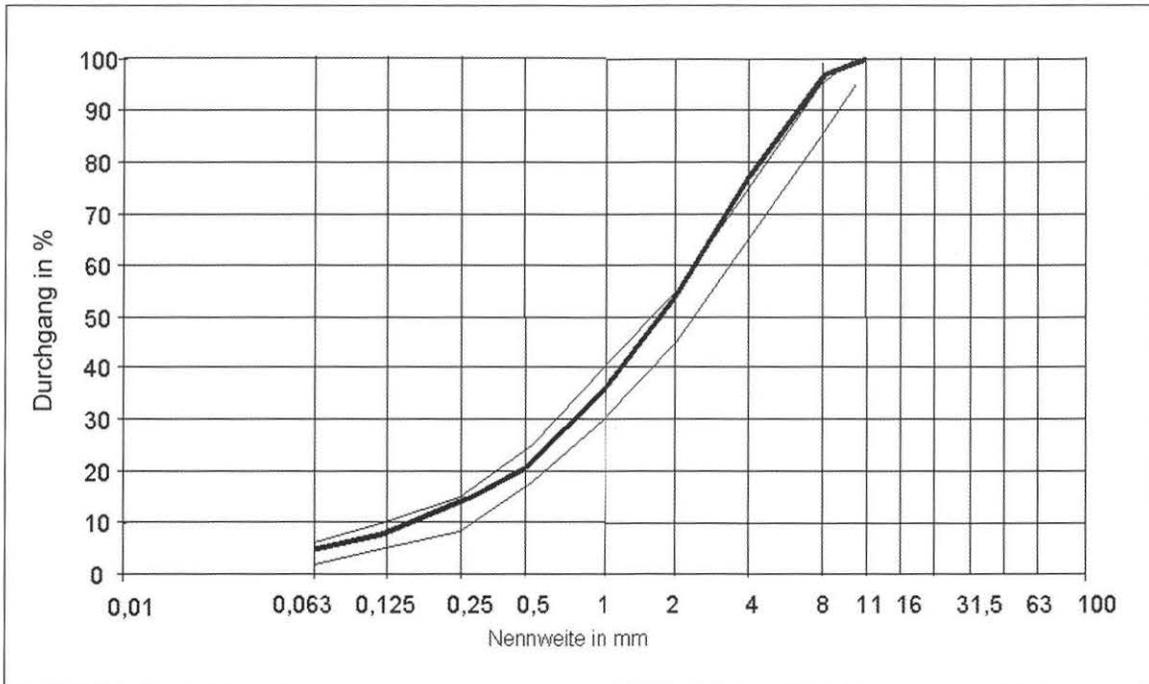


Bild 2: Sieblinie für Nassspritzbeton

Die Verwendung von getrennten Gesteinskörnungen 0/4 und 4/8 (4/11) hat sich sehr bewährt. Die Gesteinskörnungen werden im Verhältnis 0/4 zu 4/8 von 75 % zu 25 % gemischt. Ein Verhältnis 70 % zu 30 % führt in den meisten Fällen zu Pump-problemen. Ein Beispiel einer Sieblinie für Nassspritzbeton ist dem Bild 2 zu entnehmen.

3.5 Fließmittel

Als Fließmittel werden Produkte auf der Basis von synthetischen Polymeren verwendet. Einige dieser Produkte führen bis zu 7 % Luft ein, um die Verarbeitbarkeit (Pumpbarkeit) des Nassmischgutes zu verbessern. Die Wirksamkeit dieser Fließmittel im zeitlichen Verlauf ist vom Zement abhängig. Bei ungünstigem Zement treten sehr hohe Konsistenzverluste bis zu 12 cm in 60 Minuten auf. Bei günstigen Umständen wird ein Konsistenzverlust von 3-4 cm nach 2 Stunden erreicht.

3.6 Stabilisierer

Stabilisierer wirken einerseits als Verzögerer, andererseits verbessern sie das Ansteifverhalten des Nassmischgutes. Der Spritzbeton sollte eine Verarbeitungsdauer von mind. 4 Stunden aufweisen, um Arbeitsunterbrechungen bewältigen zu können. Bei höheren Dosierungen des Stabilisators wurde eine verringerte Frühfestigkeitsentwicklung festgestellt. Die Dosierung sollte so gering wie erforderlich erfolgen.

4. Zusammensetzung des Nassmischgutes

In der folgenden Tabelle sind die Grenzwerte, der derzeit in Österreich angewendeten Spritzbetonrezepturen, ersichtlich:

Mischungsbestandteil	Dimension	Untere Grenze	Obere Grenze
Zement	kg/m ³	370	420
Zusatzstoff	kg/m ³	50	0
Zuschlag 0/4	%	70	75
4/8 (4/11)	%	30	25
Wassergehalt	l/m ³	180	210
Fließmittel	% v. B.	0,4	1,0
Stabilisierer	% v. B.	0	0,2

Tab. 4: Mischgutzusammensetzung

Der Gesamtwassergehalt sollte 210 l/m³ (w/z-Wert 0,5) nicht überschreiten, da sonst der Beschleunigerverbrauch deutlich erhöht bzw. die Frühfestigkeitsentwicklung reduziert wird.

5. Eigenschaften des Nassmischgutes

5.1 Luftgehalt

Einige Fließmittel, die speziell für die Herstellung von Nassspritzbeton konzipiert sind, führen bis zu 7 % Luft ein. Eine Einführung von Luft in das Nassmischgut führt zu einem geschmeidigeren Beton, der sich leichter pumpen lässt. Durch den

Aufprall an der Auftragsfläche wird die Luft aus dem Beton ausgetrieben. Die Verwendung von herkömmlichen Luftporenbildnern ist nicht zielführend, da die Feinluft bei sehr hoher Konsistenz nicht stabil bleibt.

5.2 Konsistenz

Für eine einwandfreie Verarbeitbarkeit des Nassmischgutes ist eine Konsistenz von 55 - 60 cm günstig. Ausbreitmaße über 65 cm führen in den meisten Fällen zu einer Entmischung des Betons. Beton mit einem Ausbreitmaß unter 50 cm führt zu einer geringeren Spritzleistung und erschwert das Durchmischen des Betons mit dem Beschleuniger an der Düse. Weiters wird der Pumpendruck erhöht und der Verschleiß an der Betonpumpe steigt.

5.2.1 Konsistenzverlauf

Für den baubetrieblichen Ablauf ist eine möglichst gleichbleibende Konsistenz günstig, da die Fließmittel mit fortlaufender Zeitdauer ihre Wirksamkeit verlieren (Konsistenzverlust). Durch ein Vorhaltemaß, dass auf die max. Einbaudauer abgestimmt ist, kann dieser Konsistenzverlust bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden. Die Konsistenz inkl. Vorhaltemaß darf nicht so groß sein, dass sich der Beton beim Transport vom Mischwerk bis zum Einbauort entmischt. Im folgenden Diagramm sind beispielhaft günstige und ungünstige Konsistenzverläufe dargestellt.

Der Konsistenzverlust sollte möglichst gering sein. Eine Konsistenzsteigerung durch Nachdosieren eines Fließmittels ist aufgrund der geringen Dosiermenge der verwendeten Hochleistungsverflüssiger in der Regel nicht zielführend.

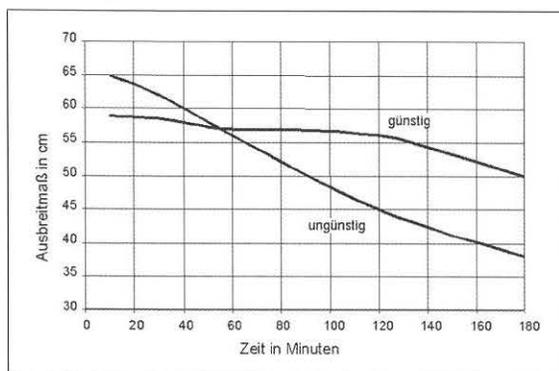


Bild 3: Konsistenzverlauf

5.3 Wassergehalt

Als günstig hat sich ein Wassergehalt von 190 - 210 l/m³ herausgestellt. Ein zu geringer Wasserge-

halt im Beton erfordert einen hohen Fließmitteleinsatz. Die innere Reibung im Beton wird erhöht und die Verarbeitbarkeit verschlechtert sich.

Wassergehalte über 210 l/m³ verringern die Frühfestigkeitsentwicklung und erhöhen den Beschleunigerbedarf.

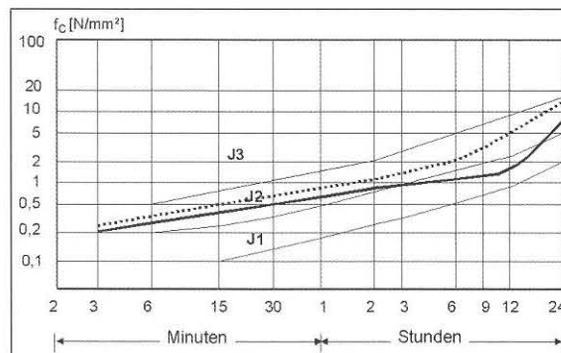


Bild 4: Verringerung der Frühfestigkeitsentwicklung durch zu hohen Wassergehalt

6. Festbetoneigenschaften des Nassspritzbetons

6.1 Frühfestigkeitsentwicklung

Die Frühfestigkeitsentwicklung von den ersten Minuten bis zu einer Stunde ist beim derzeitigen verwendeten Nassspritzbeton vergleichbar mit der eines guten Trockenspritzbetons. Die weitere Frühfestigkeitsentwicklung liegt im mittleren Bereich der Frühfestigkeitsklasse J2 (siehe Bild 4).

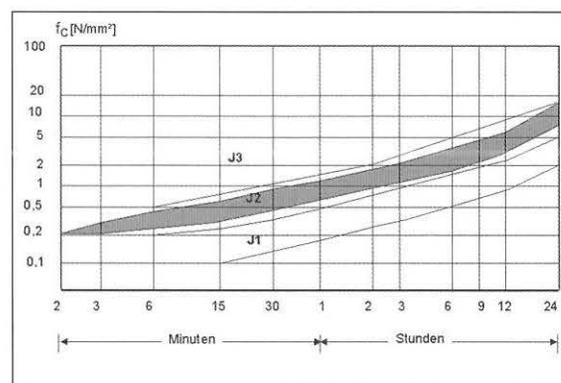


Bild 5: Frühfestigkeitsentwicklung

6.2 Endfestigkeit und Gefügedichte

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen und der Wasserundurchlässigkeitsprüfungen im Rahmen einer Güteprüfung einer Tunnelbaustelle sind in der folgenden Tabelle beispielhaft für die derzeitige Qualität des Nassspritzbetons in Österreich aufgeführt.

	Druckfestigkeit		WU
	7 d	28 d	28 d
	N/mm ²	N/mm ²	t in mm
Mittelwert	29	40	34
Anzahl der Proben	39	40	6

Tab. 5: Druckfestigkeit und Gefügedichte

Die Druckfestigkeit des Spritzbetons liegt nach 28 Tagen gesichert im Bereich SpB 30. Die Wasserdurchlässigkeit nach ÖN B 4200/T10 ist mit einer Wassereindringtiefe von 35 mm gegeben.

7. Bestehende Problempunkte

7.1 Konsistenzverlauf

Der Konsistenzverlauf und somit die Dauer des Verarbeitbarkeitsverlaufes ist von der Zement-Fließmittelkombination abhängig. Die Spannweite reicht von ausgezeichnet brauchbar bis nicht akzeptabel. Die Zugabe von Stabilisatoren führt zwar in der Regel zu einer Verbesserung der Situation, ändert jedoch nichts am Grundsätzlichen, dass die Fließmittel mit den Zementen zu unterschiedlich harmonisieren.

7.2 Restmengen

Abhängig von der zulässigen Verarbeitungsdauer ergibt sich die Problematik der Disposition und der Restmengen. Die Disposition des Mischgutes stellt hohe Anforderungen an das Vortriebspersonal. Restmengen müssen verarbeitet oder entsorgt werden, wobei beides zu erhöhten Kosten führt.

7.3 Festigkeitsabfall

Der zulässige Festigkeitsabfall von max. 15 % kann in der Regel eingehalten werden. Vereinzelt werden jedoch deutlich höhere Festigkeitsverluste festgestellt. Dieser kann bis zu 25 % betragen. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit (ca. 40 N/mm²) treten durch diesen Festigkeitsverlust keine Festigkeitsprobleme auf, da derzeit nur ein SpB 25 im Tunnelbau für den Erstsicherungsspritzbeton gefordert wird.

7.4 Dosiergenauigkeit des EB

An den Nassspritzeinheiten sind in der Regel Dosierpumpen installiert, die eine Ablesung der laufenden Dosierung in % bezogen auf das Bindemittel oder in l/min ermöglichen. Die Steuerung der Zugabemenge erfolgt bezogen auf die Spritzleistung. Dabei wird die Spritzleistung anhand eines fest einstellbaren Wertes für den Füllungsgrad der Zylinder der Betonpumpe theoretisch errechnet.

Dies setzt einen einheitlichen Füllungsgrad der Zylinder voraus, der jedoch aufgrund des Konsistenzverlustes über die Zeit nicht gegeben ist. Die angezeigten Werte für die Dosierung können daher, abhängig von der Konsistenz des Spritzbetons, von den tatsächlichen Verhältnissen abweichen.

7.5 Sulfatbeständiger Spritzbeton

Die Herstellung von sulfatbeständigem Spritzbeton im Nassspritzverfahren ist zwar generell möglich, stößt jedoch bei erhöhten Anforderungen an die Frühfestigkeit des Spritzbetons derzeit an Grenzen. Es kann aus derzeitiger Sicht nur eine Frühfestigkeit im unteren Bereich der Frühfestigkeitsklasse J2 erreicht werden. Dies ist bei auftretendem flächigen Wasserandrang in der Regel nicht ausreichend.

7.6 Kalte Jahreszeit

In der kalten Jahreszeit kann es zu einer starken Reduktion der Frühfestigkeitsentwicklung kommen. Diese wird bisher auf eine stark kühlende Wirkung der Zuschläge, die im Freien lagern, zurückgeführt.

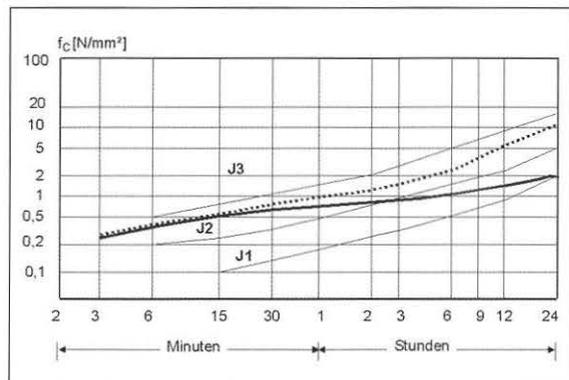


Bild 6: Frühfestigkeitsentwicklung in der kalten Jahreszeit

7. Stabilität des Beschleunigers

An Laborproben, im Rahmen von Güteprüfungen entnommen, wurde festgestellt, dass die Beschleunigerproben (eines Produktes) eine deutlich unterschiedliche Stabilität aufweisen. Einige Proben weisen bereits nach kurzer Zeit (1 bis 2 Wochen) ein deutliches Absetzen (Auskristallisieren) auf, während andere Proben nach Monaten noch einwandfrei waren (Bild 7). Dieses Phänomen wurde bei beiden Beschleunigern (A und B) festgestellt.

8. Zusammenfassung

Das Nassspritzverfahren wird derzeit in Österreich mit alkalifreier Erstarrungsbeschleunigung erfolg-



Bild 7: Auskristallisierter (links) und lagerstabiler Beschleuniger (rechts)

reich angewendet. Am Beispiel des Blisadonatunnels konnte nachgewiesen werden, dass auch flächiger Wasserandrang im Nassspritzverfahren beherrscht werden kann.

Aufgrund der Erfahrung aus den letzten Jahren hat sich jedoch gezeigt, dass noch einige Probleme einer Lösung zugeführt werden müssen. Diese sind im Hinblick auf die Zusatzmittel eine Verbesserung des Konsistenzverlaufs mit den in Österreich erhältlichen Zementen sowie eine höhere Lagerstabilität der Beschleuniger. In der kalten Jahreszeit kann es bedingt durch die tiefen Temperaturen zu einer stark reduzierten Frühfestigkeitsentwicklung kommen. Hier ist eine Entwicklung, im Hinblick auf reaktivere Zemente und abgestimmte Beschleuniger, erforderlich. Der zeitweise auftretende Festigkeitsabfall muss verringert werden.

Ein grundlegendes Problem stellt die Herstellung von sulfatbeständigem Nassspritzbeton bei ungünstigen Verhältnissen dar. Hier sind grundlegende Untersuchungen erforderlich, um die gezielte Herstellung eines dauerhaften, sulfatbeständigen Spritzbetons zu gewährleisten.