

Technologische Erkenntnisse bei Verwendung von Flugasche für Spritzbetonarbeiten

Ing. Reinhard STÜTLER

Nassereither Mischwerke Ges. m. b. H., Nassereith/Österreich

1. EINLEITUNG

Die in den vorliegenden Ausführungen beschriebenen Ergebnisse stützen sich auf Erfahrungen aus den Tunnelbauarbeiten im Tiroler Oberland in den letzten 10 Jahren, und zwar hier speziell auf die Bauten des Arlberg隧nells Ost, des Pettneuer Tunnells, des Flirscher Tunnells, des Perjentunnells und des Leermosertunnells.

Im heutigen Tunnelbau werden an den Beton höhere Anforderungen im Hinblick auf Qualität und Wirtschaftlichkeit gestellt, die umfangreiche Eignungstests und eine effektive und exakte Herstellungsüberwachung notwendig machen. Die nach der NATM ausgeführten Tunnelbauten erfordern als Stützmittel für den Vortrieb einen Spritzbeton mit äußerst kurzen Erstarrungszeiten und für die Wirksamkeit der Ankerung eine ebenso hohe Eintagesfestigkeit von mindestens 5 N/mm^2 und eine endgültige 28-Tage-Festigkeit von 22 N/mm^2 .

Das wesentliche Augenmerk liegt dabei auf der technischen Beurteilung und gegenseitigen Abstimmung der einzelnen Betonkomponenten. Die festgestellten Werte dienen auch als Unterlage für die wirtschaftliche Auswahl der Betonkomponenten und als Abnahmebedingungen für die Baustellenlieferungen.

Die geforderten Betoneigenschaften können mit den optimierten Betonkomponenten nur in Verbindung mit einer zweckmäßigen Baustelleneinrichtung und ausreichender Produktherstellungsüberwachung zur Einhaltung der gleichmäßigen Betonzusammensetzung zielsicher und wirtschaftlich eingehalten werden.

2. BETONKOMPONENTEN

2.1 Zement

Für die Herstellung des Spritzbetons mußte derselbe Zement verwendet werden wie für die Tunnelausbauten und Obertage-Kunstabauten. Diese verschiedenartigen Anwendungsbereiche verlangen die Bereitstellung eines hinsichtlich seiner Erstarrungszeit, seiner Mahlfeinheit und damit seines Wasserhaltevermögens seiner sowie Früh- und Endfestigkeit gleichmäßigen Zements. Die optimale Mahlfeinheit des Zementes sollte beim Spritzbeton trotz der starken Erstarrungsbeschleunigung eine weitgehende Hydratation mit entsprechender Nachhärtung, möglichst geringem Schwinden und den erforderlichen Festigkeiten gewährleisten. Der von den drei Tiroler Zementwer-

ken hergestellte und gelieferte Zement hatte folgende durchschnittliche Kennwerte:

spez. Oberfläche (Blainewert)	3600-4100 cm^2/g
Erstarrungsbeginn	2 h 45 min
Erstarrungsende	3 h 45 min
Druckfestigkeit nach 1 d	12,2 N/mm^2
Druckfestigkeit nach 28 d	46,5 N/mm^2

2.2 Flugasche

Nach eingehenden und umfangreichen Voruntersuchungen wurden Flugasche-Produkte zur Spritzbetonherstellung erstmals im Jahre 1975 beim Arlberg隧nells eingesetzt. Zur Auswahl stand die vermahlene Flugasche vom Dampfkraftwerk St. Andrä (Flual) und vom Dampfkraftwerk Riedersbach. Beide Flugaschen hatten folgende Kennwerte:

spez. Oberfläche (Blaine-Wert)	4 900 cm^2/g
Rohdichte	2,36 g/cm^3
Glühverlust	2,40 %
SO_3 -Gehalt	0,90 %

2.3 Betonzuschläge

Als Betonzuschläge kamen sowohl Urgesteine, z.B. Gneis, als auch Wettersteinkalke zur Anwendung. Sie wurden in den Korngruppen 0,063 bis 4 mm, 4/8 und 8/16 mm zu optimalen Sieblinien für den Spritzbeton zusammengesetzt. Besonderes Augenmerk wurde auf einen minimalen Schwankungsbereich des Sandes 0,063 bis 4 mm gelegt, da insbesondere der Mehlkorngelalt und der Staubgehalt wesentlichen Einfluß auf das Erstarrungsverhalten ausüben.

2.4 Zusatzmittel

Die erstarrungsbeschleunigenden Zusatzmittel wurden hinsichtlich ihrer beschleunigenden Wirkung bei möglichst geringer Dosierung und hinsichtlich des Festigkeitsabfalls nach 28 Tagen geprüft. Eine Laborprüfmethode ermöglichte dabei eine rasche Beurteilung des angelieferten Zusatzmittels.

2.5 Betonzusammensetzung

Nach den erfolgten Voruntersuchungen und Festlegung und Abstimmung aller Spritzbetonkomponenten wurden die Laborergebnisse durch Versuche an Probespritzbetonen auf der Baustelle überprüft, wobei Spritzbetone mit und ohne Zusatzmittel hergestellt wurden. Aus dem zusatzmittelfreien Spritzbeton konnten im frischen Zustand durch Trocknungs- und Ab-

schlammproben die tatsächliche Kornverteilung des anhaftenden Spritzbetons (also unter Berücksichtigung des Rückpralls), die Frischbetonrohichte, die Bindemitteldosierung und der W/Z-Wert ermittelt werden. Die Kornverteilung des abgeseibten Spritzbetons stimmte mit dem angestrebten Sieblinienbereich überein, was neben dem hohen Raumgewicht den guten Kornaufbau des Spritzbetons bewies.

Bei den Labor- und Baustellenversuchen wurde festgestellt, daß für die erforderliche Abbindezeit und Frühfestigkeit des Spritzbetons bereits 320 kg/m^3 Zement ausreichen, während die hohe Dosierung von 380 bzw. 400 kg/m^3 für die Einhaltung der 28-Tage-Festigkeit notwendig ist. Ein Teil des Bindemittels wurde nun durch den Zusatzstoff Flugasche ersetzt. So konnte die Endfestigkeit ohne Minderung der Frühfestigkeit wesentlich verbessert werden. Der Flugascheanteil erfordert keinen Spritzbetonbeschleuniger, so daß der Zusatzmittelverbrauch und damit der Festigkeitsabfall des Spritzbetons geringer wurde. Bis zu 28 Tagen reagiert aber die Flugasche als Zementersatz, wobei für den Nullbeton ohne Zusatzmittel 95 % der Festigkeit des Zementes erreicht werden.

Somit ist der Beitrag zur Festigkeitsleistung der Flugasche höher als der von Zement und Beschleuniger. Bei Ersatz von 15 % des Zementes durch Flugasche wurde deshalb die Spritzbetonfestigkeit nach 28 Tagen bei reduziertem Zusatzmittelverbrauch um ca. 8 - 10 % verbessert, d.h. bei abgestimmtem Einsatz von Flugasche für den Spritzbeton konnte sowohl ein wirtschaftlicher als auch ein qualitativer Vorteil erzielt werden.

Während die Festigkeitsleistung des Zementes für die 28 Tage-Festigkeit infolge des Zusatzmittels nur zwischen 60 und 65 % der Festigkeit des reinen Zementes beträgt, erreicht das Zement/Flugasche-Gemisch 90 - 95 %, da die Flugaschereaktion nicht vom Zusatzmittel beeinflusst wird. Die Menge des Erstarrungsbeschleunigers bleibt bei steigendem Flugaschegehalt gleich. Sie ist also nur vom Zement abhängig. Aufgrund der Temperaturverhältnisse im Tunnel und der Nachweisführung des Erhaltes der Festigkeit nach 28 Tagen wurden auch nach 56 Tagen Proben entnommen und der Beurteilung unterworfen. Mit dem Zement/Flugasche-Gemisch konnten im Alter von 56 Tagen Festigkeitssteigerungen von 12 bis 15 % erzielt werden. Die Höhe der Flugaschedosierung richtet sich nach der geforderten Erstarrungsbeschleunigung, der Vortriebsgeschwindigkeit und der Früherhärtung unter Berücksichtigung der jeweiligen Temperaturverhältnisse sowohl der Tunnelumluft als auch der Temperatur des Spritzbetonmischgutes.

So konnten für Spritzbetonarbeiten im Strossenbereich höhere Flugaschedosierungen als im Kalottenbereich vorgenommen werden.

Grundsätzlich wirken sich längere Standzeiten des Spritzbetongemischs ungünstig auf Erstarrungsverhalten und Festigkeitsentwicklung aus.

Durch die zugesetzte Flugasche bzw. die dadurch reduzierte Zementmenge wurde auch das Hydratationsverhalten des mit durchschnittlich 3 - 5 %iger Eigenfeuchte angereicherten Spritzbetonmischgutes beeinflusst. Die zum Teil um 25 % überschrittenen Verbrauchsfristen des Spritzbetonmischgutes erbrachten keine wesentlichen Qualitätsunterschiede gegenüber dem ordnungsgemäß verbrauchten Mischgut.

3. SPRITZBETONHERSTELLUNG UND -VERARBEITUNG

Die Flugasche wurde zumeist mit der Bahn mit Umlasen auf dem jeweiligen Bahnhof angeliefert, mit Silo-LKWs zur Mischanlage transportiert und im Stahlsilo deponiert.

Die Flugasche wird über Zementschnecken und automatische Additivverwiegung in den jeweiligen Zwangsmischer gegeben. Zur Homogenisierung mußte bei einem Kubikmeter eine Mischdauer von 60 Sekunden eingehalten werden. Der Transport zu den einzelnen Verarbeitungsstellen erfolgte mittels Transportmischer, der tunlichst zur Vermeidung von Klumpenbildung das Agitieren während des Transports zu unterlassen hatte. Das so angelieferte Trockenmischgut wurde in einen fahrbaren Silo abgegeben. Über zwei Förderbänder mit aufgebauten eichbaren Schnellbindemitteldosieranlagen (Dosiergenauigkeit $\pm 0,5 \%$) wurde das Gemisch den Rotorspritzmaschinen zugeführt und von dort über maximal 25 m lange Schlauchleitungen mit einem Durchmesser von 65 mm zur Düse gefördert. Die erforderliche Wasserzugabe wurde von Hand vor Ort gesteuert.

Durch die kontinuierliche Produktüberwachung hinsichtlich der Eigenfeuchte des Trockenmischgutes konnten auch vor Ort bei gleichmäßiger Wasserdosierung die Qualitäten eingehalten werden. Wesentlich zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Qualität ist der konstante Betriebsdruck durch eine entsprechend große Kompressoranlage, konstante Umdrehungsgeschwindigkeit von Taschenrad und Rotor und einer entsprechenden Wartung der Überluftöffnungen. Eine möglichst gerade Schlauchlegung, besonders im Spritzdüsenbereich, und gleichmäßiger Spritzdüsenabstand von der zu verschließenden Gebirgsflächen gehören ebenfalls dazu. Vorteilhaft sind Leistungen von 6 - 8 m^3 je Stunde, die einen homogenen Aufbau der Spritzbetonschichten gewährleisten.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß der Spritzbeton mit seinen hervorragenden Eigenschaften bezüglich Festigkeit und Verformbarkeit zum maßgeblichen Stützmittel in der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise wurde. Vornehmlich ist es die rasche Anwendungsmöglichkeit, um freigelegt Ausbruchlaibungen sofort versiegeln zu können. Von besonderem Vorteil ist das rasche Erreichen relativ hoher Festigkeiten, wodurch vom Beton sofort tragende Funktionen übernommen werden.

Die Funktion des Spritzbetons im Hohlraumbau ist eine Mehrfache: Einmal dient sie als versiegelndes, also schützendes Element vor atmosphärischen Angriffen, womit der chemischen Veränderung und Verwitterung des Gebirges Einhalt geboten werden kann. Zum anderen werden Kerben versiegelt und damit Spannungskonzentrationen am Hohlraumrand vermindert und schließlich, wenn der Spritzbeton in größeren Stärken über die Oberflächenvergütung hinaus aufgebracht wird, übernimmt er auch die Funktion des Gewölbes. Diese Anforderungen an den Spritzbeton wurden mit Zusatz von Flugasche bestens erfüllt, ja man kann sogar behaupten, daß das Zement/Flugasche-Gemisch sowohl in der Spritzbetontechnik als auch im übrigen Massenbaubeton neben dem wirtschaftlichen Vorteil vor allem qualitative Verbesserungen während der Verarbeitung und als Endprodukt erbrachte. Da es sich bei der Flugasche um ein Abfallprodukt der Wärmekraftwerke handelt, trägt die Verarbeitung von verwertbaren Abfallprodukten in der Betontechnologie dazu bei, die Umweltbelastung zu verringern.