

Sulfatbeständiger Spritzbeton – Baupraktische Erfahrungen mit flüssigen Erstarrungsbeschleunigern

Dipl.-Ing. Hans Georg JODL
ARGE U 3-Stubentor, Wien

1. ALLGEMEINES

Eine wesentliche Bedeutung in der heutigen Tunnelbautechnologie kommt dem Spritzbeton zu. Die meisten technischen Zusammenhänge sind in Theorie und Praxis vielfach erprobt. Dennoch gibt es immer wieder Probleme mit Verfahrensweisen, die mangels vorhandener Grundlagen oder Vergleiche den Praktiker von der Verwendung abhalten.

Dieses Referat ist ein baupraktischer Erfahrungsbericht über die erfolgreiche Anwendung flüssiger Spritzhilfe im Trockenspritzverfahren zur Herstellung von sulfatbeständigem Spritzbeton mit HS-Zement und Flugasche auf der U-Bahn-Baustelle U6/1 in Wien.

2. EINLEITUNG

Aufgrund der vor der Ausschreibung durch Probebohrungen aufgeschlossenen Geologie war mit relativ hohem Sulfatgehalt zu rechnen. Der Bauherr schrieb daher die Verwendung von

hochsulfatbeständigem Zement für die Außenschale bindend vor, ebenso die Verwendung von flüssigem Erstarrungsbeschleuniger. Nachdem hierüber zu Baubeginn wenig Erfahrungen und Vergleichsdaten vorlagen, mußten umfangreiche Eignungsversuche durchgeführt werden.

3. EIGNUNGSPRÜFUNG

Zu diesem Zweck wurde ein vergleichbares Tunnelprofil im Wiener Raum herangezogen und eben dort im März 1983 ein Eignungstest unter tatsächlichen Tunnelbedingungen gemeinsam mit Auftraggeber und den prüfenden Stellen der Gemeinde Wien abgewickelt.

Im betreffenden Tunnel wurden einzelne Streifen mit 1 m Breite und 15 cm Stärke unter Verwendung verschiedener Spritzmittelprodukte und Kiese aus verschiedenen Kiesgruben aufgespritzt.

Eine Regelcharge beinhaltete je m³ 350 kg Contragreg PZ 375, 55 kg Flugasche Flual,

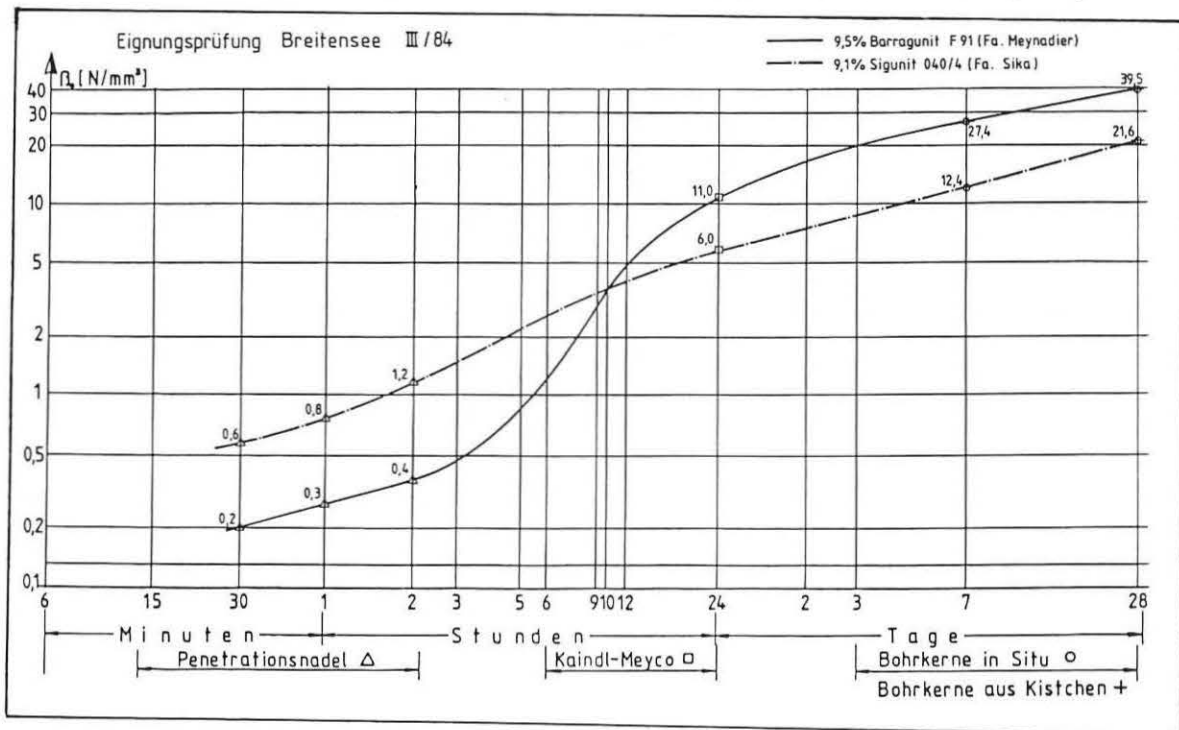


Abb.1. Festigkeitsentwicklung, Eignungsprüfung Breitensee.

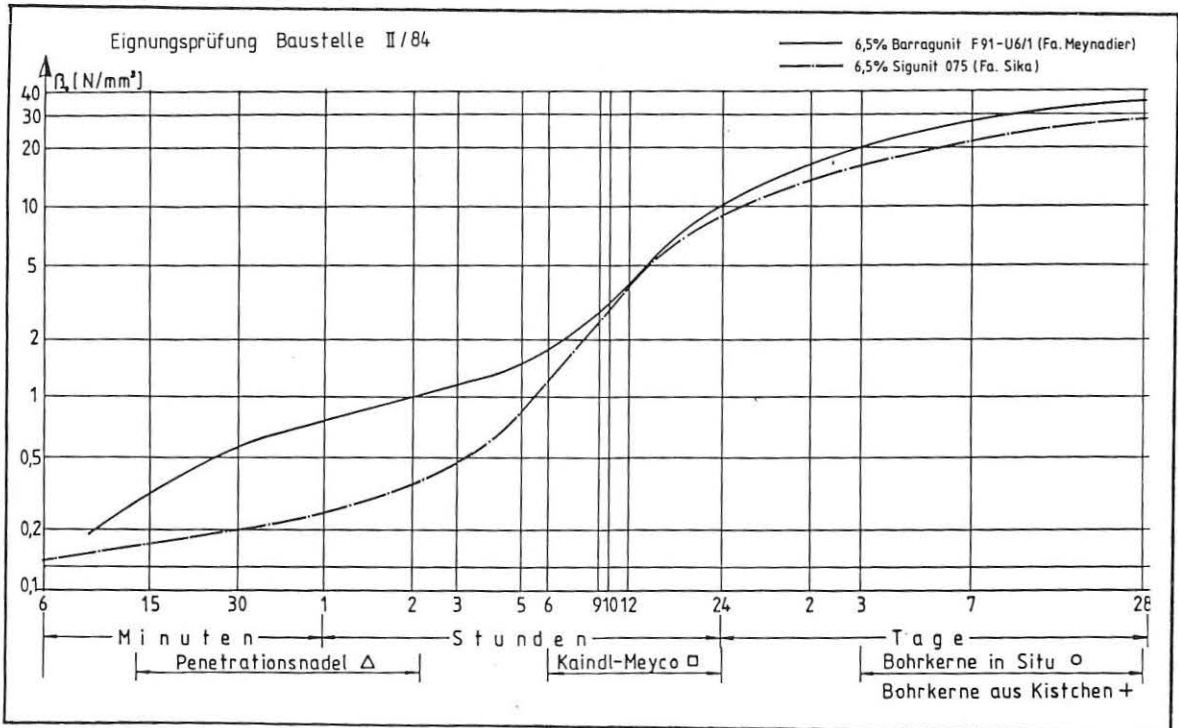


Abb.2. Festigkeitsverlauf, Eignungsprüfung Baustelle.

1750 kg Zuschläge 0/16 und 6 % Spritzhilfe, bezogen auf das Bindemittelgewicht. Für jeden der verwendeten Zuschlagstoffe wurde ein "Nullbeton" ohne Beigabe von Spritzhilfe hergestellt. Insgesamt wurden aus je 2 Zuschlagarten und je 2 Spritzhilfen für 4 verschiedene Kombinationen Erstarrungsverlauf und Sieblinien ermittelt.

Als offenes Problem wurde bereits zu diesem Zeitpunkt die Frage der Dosierung und der Dosierpumpen erkannt. Die effektive Dosierung lag mit bis zu 9,6 % weit über der geforderten Labordosierung von 6 %.

Die Festigkeitsentwicklung zeigt bei annähernd gleicher Dosierung unterschiedliche Werte in der Frühfestigkeit, im Festigkeitsanstieg und in der Endfestigkeit (Abb.1). Trotz des vorerst noch unbefriedigenden Ergebnisses (entweder hohe Frühfestigkeit und niedrige Endfestigkeit oder umgekehrt) konnte bereits der positive Einfluß der Flugasche auf die Endfestigkeitsentwicklung in Bezug auf den Festigkeitsabfall nachgewiesen werden.

Es wurde Ende Februar 1984 noch ein Versuch unter gleichen Bedingungen gefahren, dessen Ergebnisse in Abbildung 2 dargestellt sind. Die Kurven zeigen eine deutliche Anhebung der Frühfestigkeit bei Barragunit und eine Erhöhung der Endfestigkeit bei Sigunit, jedoch unter Inkaufnahme einer Verringerung der Frühfestigkeit.

4. PRODUKTION

Die Mischanlage für den Spritzbeton wurde aus abwicklungstechnischen Gründen unmittelbar neben den zentralen Schacht Wagenseilgasse gestellt. Es handelt sich um eine Huggler ZM mit 375 l Zwangsmischerinhalt. Die Leistung der Anlage liegt bei etwa 20 m³/h. Neben der

Mischanlage wurden die beiden Kiessilos (je 200 t), der Zementsilo (70 t) und der Flugaschesilo (70 t) situiert. Die Anlage ist halbautomatisch gesteuert und für drei Mischprogramme eingestellt (Abb.3).

Unmittelbar unter der Anlage stehen zwei elektrisch angetriebene Spritzbetonmaschinen vom Typ Meyco GM 090. Über eine Aufgabeweiche können gleichzeitig mittels pneumatischer Schieber beide Spritzbetonmaschinen und ein Förderband für Filterkiesabnahme beschickt werden.

Die Förderleitung mit Nennweite 65 mm in den Schacht wird mit Schläuchen geführt, im Tunnel sind Torkret-Rohre mit Schnellkupplungen installiert. Die maximale Leitungslänge von der Spritzmaschine zur Ortsbrust betrug ca. 300 m. Diese Pumplänge wurde nahezu ohne Stopfer überwunden.

5. DOSIEREINRICHTUNG

Der flüssige Erstarrungsbeschleuniger Barragunit F 91 wird mit pneumatisch betriebenen und elektronisch gesteuerten Dosierpumpen Typ UKO-DP 202 dem Anmachwasser zugemischt. Das Gemisch wird in einem Zollschlauch zur Spritzdüse vor Ort gepumpt. In der Frostperiode wird außerdem über einen Elektroboiler Heißwasser (35° C an der Mischarmatur) zugemischt.

Im Zuge der baupraktischen Durchführung wurde die Pumpe als Schwachpunkt erkannt.

Ein eingebautes Steuerventil und ein nachgeschaltetes Schmutzsieb waren des öfteren Ausfallursachen. Durch Kristallbildung wurden die Siebe relativ häufig verlegt und durch Verringerung der Ansaugmenge die Dosierung im Anmachwasser verändert. Auch ist die Konstruktion der Kolbendichtungen im rauen Baustellenbetrieb überfordert.

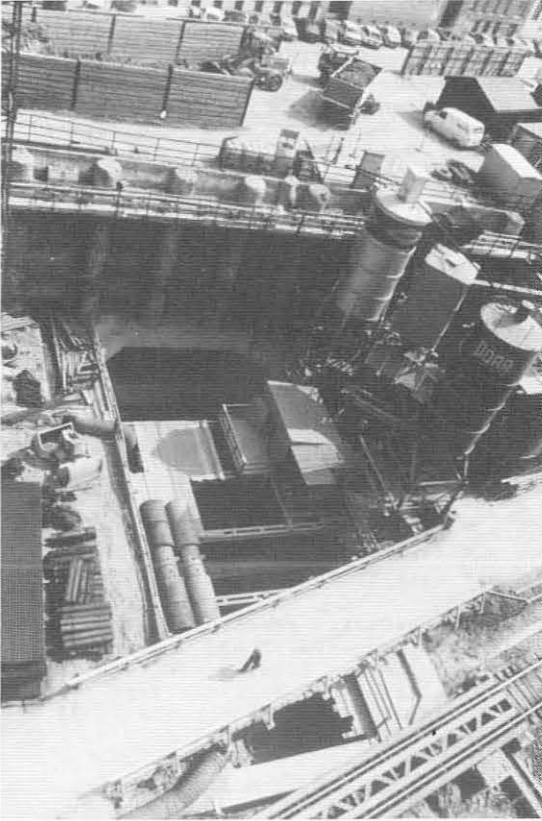


Abb.3. Spritzbetonanlage Anfahrtschacht U6/1.

Bei höheren Außentemperaturen wurde manchmal Eisenhydroxidschlamm in Flockenform als Ausfallerscheinung am Boden der Liefergebäude beobachtet. Dies konnte als Stabilitätsproblem erkannt und behoben werden.

Der Hersteller trug den Problemen Rechnung und entwickelte eine neuartige, elektrisch betriebene Dosierpumpe Typ LEWA EK 1, die den Erfordernissen des Baustellenbetriebes entspricht (Abb.4). Diese Pumpe arbeitet nach dem Prinzip der oszillierenden Verdrängung und besitzt eine einfache Einrichtung zur stufenlosen Verstellung der Kolbenhublänge während des Betriebes. Durch permanente Schmierung der Stopfbuchse mit Wasser entfällt die Dichtungsproblematik.

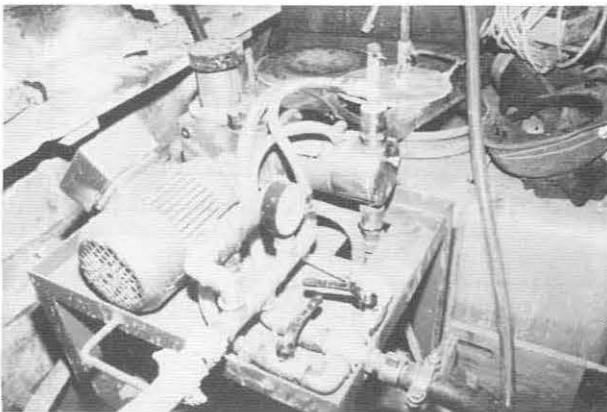


Abb.4. Dosierpumpe LEWA EK 1.

Seit Umrüstung auf diese Dosieranlage treten weder Veränderungen der Dosierung noch Probleme mit der Pumpe auf.

Das Spritzmittel wird in Kunststoffcontainern à 1000 kg angeliefert und in einer wintersicheren Einhausung direkt bei den Pumpen gelagert.

6. KOMPONENTEN

Die Zusammensetzung der Spritzbetongemische auf U 6/1 ergibt sich aus folgenden Komponenten:

6.1 Zement

Als Zement kommt hochsulfatbeständiger Contragreßzement PZ 375 der Perlmöser Zementwerke aus dem Werk Mannersdorf bei Schwechat zur Anwendung. Dieser hat einen C₃A-Gehalt nach Bogue von 0 %. Durch Bemühen der Perlmöser Zementwerke kann die spezifische Oberfläche gleichmäßig auf einen mittleren Blaine-Wert von 3 900 cm²/g gehalten werden. Die Schwankungen betragen im Durchschnitt max. + 150 cm²/g. Der Zement wurde im 70 t-Silo gelagert.

6.2 Flugasche

Als puzzolane Beimengung wird ausschreibungsgemäß Flugasche verwendet, ein Restprodukt der Braunkohlenverfeuerung des Dampfkraftwerkes St. Andrä im Lavanttal der Österreichischen Draukraftwerke. Die Dosierung liegt bei 10 - 15 % vom Zementgewicht. Auch hier werden mit hoher Gleichmäßigkeit Blainewerte von 4 800 cm²/g erreicht. Die Lagerung erfolgt im 70 t-Silo.

6.3 Spritzhilfe

Die Erstarrungsbeschleunigung wird mit der flüssigen Spritzhilfe Barragunit F 91 von Meynadier vorgenommen. Die Dosierung liegt zwischen 4 und 6 %, bezogen auf das Bindemittelgewicht.

Die Optimierung der chemischen Bestandteile des Spritzmittels erfolgt im wesentlichen empirisch. Der bevorzugte Arbeitsbereich liegt innerhalb eines metastabilen Zustandes, d.h. er verhält sich stabil, solange Stabilisatoren ein Keimwachstum verhindern und somit zumindest im Verarbeitungszeitraum keine Kristallbildung erfolgt.

Dies entspricht im angelieferten Container etwa einer 30 %igen Lösung, wobei der Gehalt an wasserlöslichem Aluminat (Al₂O₃) möglichst gering sein soll. Das Spritzmittel wird in regelmäßigen Abständen überprüft und zeigt mit Labordosierung von 6 % einen Erstarrungsbeginn bei etwa 58 Sekunden und ein Erstarrungsende bei ca. 2 Minuten. Gelagert wird das Mittel in einem temperaturkonstant beheizten Depotraum.

6.4 Zuschlagstoff

Als Zuschlagstoff wird Kies der Firma Kies-Union aus der Kiesgrube Markgrafneusiedl in getrennten Korngruppen 0/4, 4/8 und 8/16 verwendet. Dieser Zuschlag besteht aus Rundkorn Donauschotter und entspricht konstant annähernd der Gesamtsieblinie B 16 der ÖNORM B 3304. Die Eigenfeuchte der Sandfraktion 0/4 darf 6 % nicht übersteigen. Die Lagerung erfolgt in Stahlhochsilos mit Bodenabzug. Während der Frostperiode werden die Zuschlagstoffsilos mit Planen eingehaust und mit Warmluftstrom frostfrei gehalten.

7. REZEPTUR

Der betontechnologische Berater der ARGE erarbeitete aufgrund der Eignungstests eine allen Anforderungen entsprechende Spritzbetonrezeptur, die im Zuge der Anwendung den baustellenspezifischen Gegebenheiten angepaßt wurde.

Alle Werte sind auf den Bohrkern nach 28 Tagen bezogen.

Tabelle 1. Optimierter Spritzbeton B 225.	
Zuschlagstoff	
Kornfraktion 0/4	1.170 kg/m ³
Kornfraktion 4/8	300 kg/m ³
Kornfraktion 8/16	450 kg/m ³
insgesamt	1.920 kg/m ³
Bindemittel	
Contragrebzement PZ 375	330 kg/m ³
Flugasche Flual	35 kg/m ³
insgesamt	365 kg/m ³
Erstarrungsbeschleuniger	
Barragunit F 91 flüssig	20 kg/m ³
Anmachwasser	
	80 kg/m ³
Frischbetongewicht	2.385 kg/m ³
mittlere Rohdichte	2.350 kg/m ³
mittlerer E-Modul	25.000 N/mm ²
mittlere Druckfestigkeit	38,0 N/mm ²

8. FESTIGKEITSENTWICKLUNG

Die Ausschreibung sieht für die Spritzbetonaußenschale eine Festigkeitsklasse B 225, das sind 22,5 N/mm² nach 28 Tagen bei einer mittleren Stärke von 15 cm im Pfeilerstollen und 20 cm im Regelprofil vor.

Gemäß ÖNORM B 4200, Teil 10, ist für diese Festigkeitsklasse ein Vorhaltemaß von 6 N/mm² einzuhalten. Wegen der größeren Gütestreuung bei Spritzbeton ist jedoch für diesen ein erhöhtes Vorhaltemaß von 8 N/mm² vorgeschrieben, so daß die mittleren Festigkeiten nach 28 Tagen mit 30,5 N/mm² nachzuweisen sind (Abb.5).

Die vom Betongutachter unter Berücksichtigung des Erstarrungsverhaltens abgegebene Empfehlung zur Festigkeitsentwicklung sieht folgenden ausgewiesenen Verlauf vor:

- 1,0 N/mm² nach 2 Stunden
- 2,5 N/mm² nach 6 Stunden
- 10,0 N/mm² nach 24 Stunden
- 30,5 N/mm² nach 28 Tagen

Die in der Baupraxis erreichten Festigkeiten sind im Band dargestellt und übertreffen die Anforderungen in der Regel mindestens um eine Festigkeitsklasse. Der mittlere Wert der Festigkeit nach 28 Tagen liegt bei etwa 38 N/mm². Die Streuung beträgt im Mittel ± 15 %.

9. ÜBERWACHUNG

Die Einhaltung aller Vorschriften wird laufend überwacht. Als gut brauchbar und den Vortrieb kaum behindernd kommen zwei Frühfestigkeitsprüfverfahren zum Einsatz. Für die Prüfung der ersten Frühfestigkeit wird die Penetrationsprüfung nach Kusterle (5) mit einem modifizierten Proctor-Penetrometer herangezogen. Zuverlässige Ergebnisse können in-

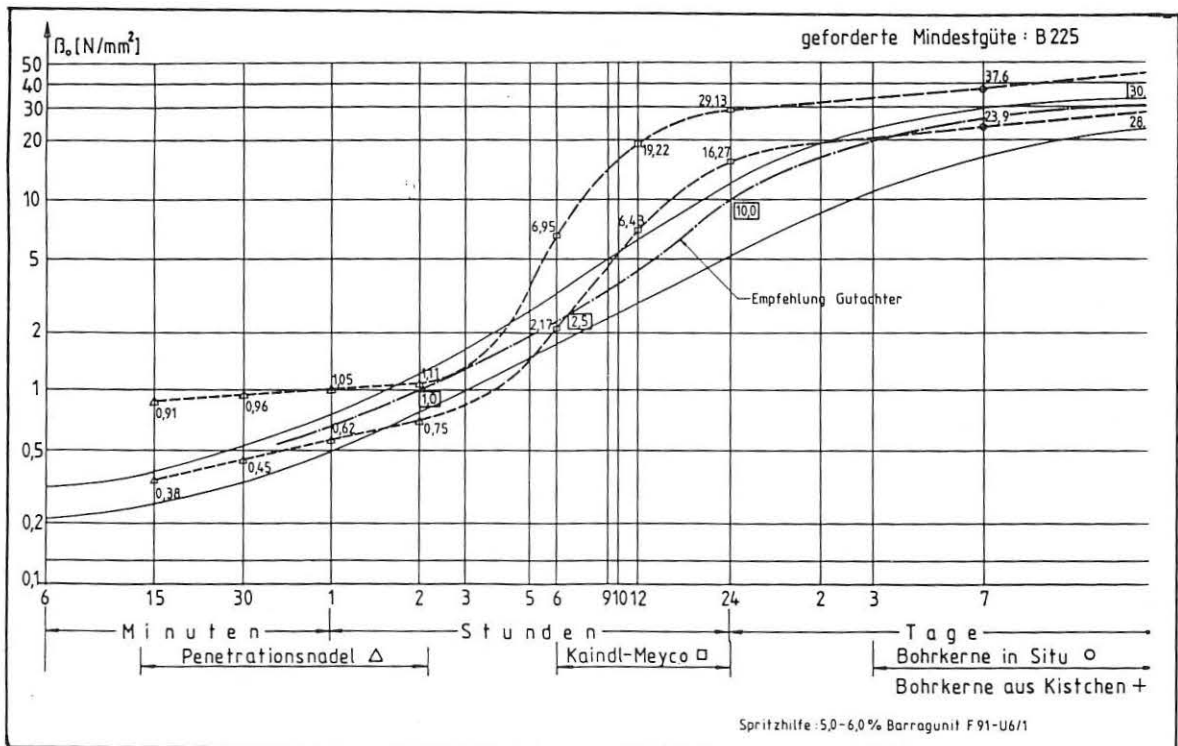


Abb.5. Festigkeitsentwicklung B 225.

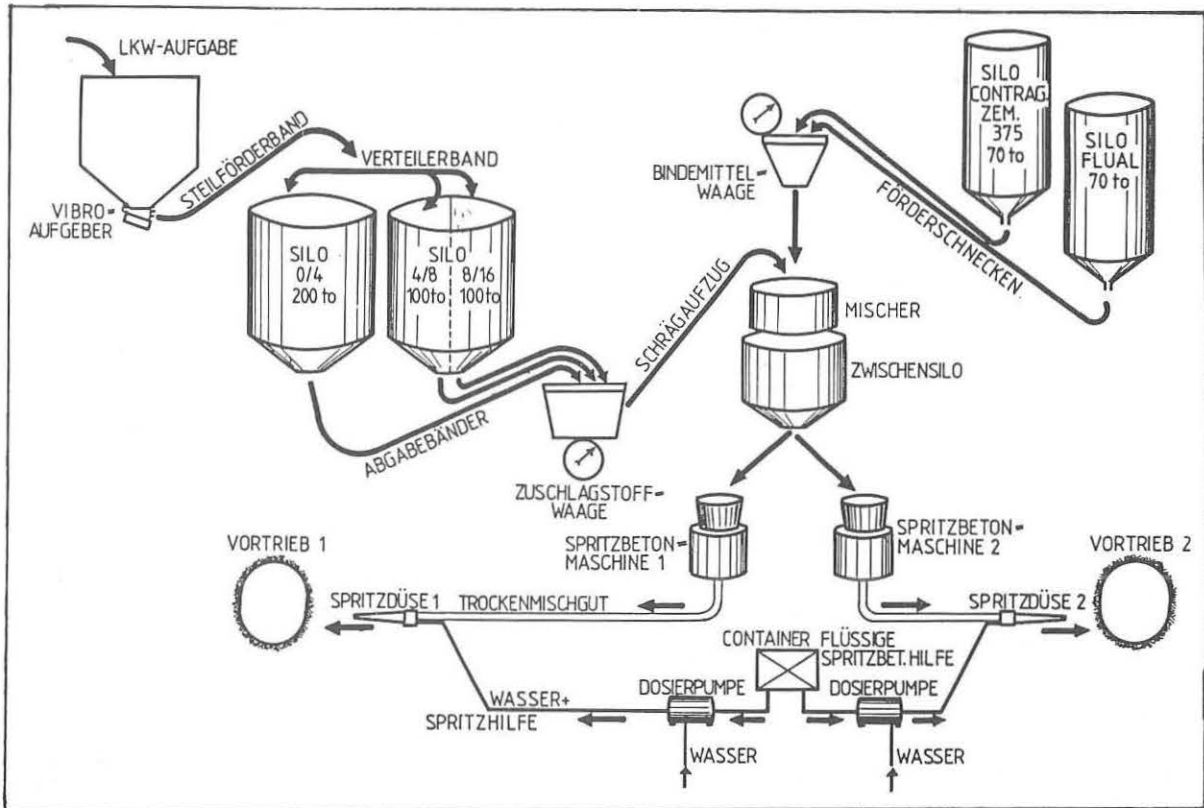


Abb.6. Ablaufschema der Spritzbetonproduktion

nerhalb der Erstarrungszeit von 15 Minuten bis etwa 2 Stunden ermittelt werden. Das entspricht einem Festigkeitsbereich von ca. 0,3 bis 1 N/mm².

Im Zeitabschnitt 6 bis 24 Stunden Erstarrung wird die Ausziehmethode nach Kaindl-Meyco herangezogen. Dies entspricht einem Einsatzbereich zwischen 4 und 25 N/mm². Gemessen wird die Scherzugfestigkeit. Die Festigkeitsentwicklung nach 28 Tagen, fallweise auch nach 3 und 7 Tagen, sowie der E-Modul werden durch Bohrkernentnahmen aus dem Bauwerk überprüft. Diese Tätigkeit obliegt der Prüfanstalt der Gemeinde Wien MA 39.

Sämtliche bisher erwähnten Festigkeitsprüfungen werden wöchentlich einmal durchgeführt. Dies entspricht einer Vortriebsleistung von ca. 12 lfm/Woche bzw. einer Spritzbetonfläche von ca. 440 m² oder einer verarbeiteten Menge von 110 m³ Spritzbeton (d = 25 cm).

Zusätzlich werden monatlich eine Schnellprüfung auf Sulfatbeständigkeit nach Lukas und eine Zementprüfung durchgeführt. Alle zwei Monate erfolgt eine umfassende Prüfung des Erstarrungsbeschleunigers.

10. PRAKTISCHE ERKENNTNISSE

Die baupraktischen Erfahrungen mit sulfatbeständigem Spritzbeton unter Verwendung flüssiger Spritzhilfe lassen sich wie folgt zusammenfassen:

10.1 Zement

Die Verarbeitung von C₃A-armem Zement in der beschriebenen Qualität ist für Spritzbeton problemlos. Der Zement soll möglichst gleichmäßig einen hohen Blainewert, d.h. eine große spezifische Oberfläche aufweisen.

10.2 Flugasche

Die Beimengung von gut und gleichmäßig vermahlener Flugasche ist zweckmäßig, sie verbessert wesentlich die Gefügedichte und verringert den Festigkeitsabfall erheblich. Bei mittleren 28 Tage-Festigkeitswerten des zusatzmittelfreien Nullbetons von ca. 45 N/mm² und des Bauwerksbetons von ca. 38 N/mm² beträgt der Festigkeitsabfall im Mittel 16 %.

Sie vermindert durch eine gewisse Klebewirkung den Rückprall. Laufende Messungen auf der Baustelle ergeben durchschnittlich Werte von 23 bis 25 %. Diese Klebewirkung vermindert wohl auch die Staubeentwicklung. Der geringe Rückprall wird auch von dem im Wiener Raum erhältlichen idealen Rundkorn mit beeinflusst.

10.3. Transportverhalten

Festgestellt wurde auch eine deutliche Verbesserung des Transportverhaltens der Trockenmische. Die Ursache liegt einerseits in der relativ großen spezifischen Oberfläche, wobei sich ein gewisser Schmieringseffekt ergibt, und der hydraulischen Inaktivität der Flugasche.

Es sei andererseits auch auf den Einfluß der Anlage der stationären Spritzbetonmaschinen über Tage hingewiesen. Durch Vermeidung mehrmaligen Transportschläges kann das Alter der Trockenmische beim Spritzvorgang vor Ort auf 3 bis 5 Minuten beschränkt werden. Der sonst unvermeidliche Beginn eines teilweisen Abbindevorgangs zufolge der Eigenfeuchte der Trockenmische entfällt.

Die Summe dieser positiven Einflüsse verbessert das Förderverhalten des Mischgutes erheblich, wodurch Förderweiten von über 300 m problemlos ohne Stopfer zu fahren sind.

10.4 Spritzhilfen

Zur Beschleunigung der Erstarrung dieser sulfatbeständigen Spritzbetonkomponenten hat sich die Verwendung flüssiger Spritzhilfen sehr gut bewährt.

Ein Vorteil der flüssigen Spritzhilfe liegt zweifellos in der wesentlich geringeren Staubeentwicklung. Es treten nahezu keine Hauterkrankungen oder Reizungen auf. Bei der Manipulation mit den Gebinden ist entsprechende Sorgfalt anzuwenden.

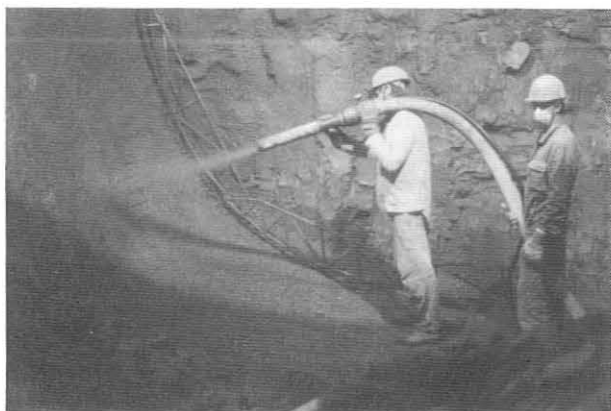


Abb.7. Spritzvorgang - aus der Nähe betrachtet.

Durch gleichmäßige Beigabe über Pumpen ist eine Zwangsvermischung mit hoher Dosiergenauigkeit gegeben.

Die Vormischung im Anmachwasser bewirkt gleichmäßige Verteilung im Spritzbeton. Örtliche Festigkeitsverluste und Streuungen werden vermieden und die Spritzbetonqualität wird verbessert.

Die Wirkung der Chemikalien wird weitgehend ausgenutzt, was zu insgesamt niedriger Dosierung führt und den Rückprall verringert.

Die Dosiereinrichtung ist handlich, robust und leicht zu manipulieren. Nachschub und die Lagerung in kompakten Gebinden sind ohne Verluste abzuwickeln.

Pulverförmige Spritzmittel sind nach wie vor bei starkem Wasserandrang erforderlich, es genügt jedoch einfaches Zugeben ohne Umstellung. Pulver sind wesentlich stärker dosierbar, da sie nicht an Löslichkeitsgrenzen gebunden sind. Örtlich sind starke Überkonzentrationen möglich, die auch durch zusätzlich austretendes Wasser nicht zu stärkerer Verdünnung führen. Allerdings ist dann mit sehr großen Festigkeitseinbußen zu rechnen.

Laufende Kontrollen des Frühfestigkeitsverlaufes ermöglichen angepaßte Rezeptkorrekturen ohne große Festigkeitsschwankungen.

11. ZUSAMMENFASSUNG

Abschließend kann gesagt werden, daß sulfatbeständiger Spritzbeton, unter Einbeziehung von Flugasche und der Verwendung flüssiger Spritzhilfen, unter Beachtung vorgenannter Randbedingungen, vorbereitender Eignungsprüfungen und laufender Überwachung, im innerstädtischen Tunnelbau mit ausgezeichnetem Erfolg angewendet werden kann.

LITERATUR

1. Blümel, O.W., und Lutsch, H.: Spritzbeton, Springer Verlag 1981.
2. Deix, F.: U6/1 - Pottendorfer Straße; Der Aufbau, Fachschrift der Stadtbaudirektion Wien, Heft 5, 1984.
3. Huber, H.: Neue Entwicklungen bei Spritzhilfen; Zement und Beton, Heft 3, 1981.
4. Jodl, H.G.: U6/1 - Baustelleneinrichtung Spritzbeton; Der Aufbau, Fachschrift der Stadtbaudirektion Wien, Heft 5, 1984.
5. Kusterle, W.: Optimierung der Komponenten für Spritzbeton; Universität Innsbruck, Dissertation 1983.