

# Stahlfaserverstärkter Spritzbeton – Eignungsprüfung für möglichen Einsatz beim Wiener U-Bahn-Bau

Dipl.-Ing. Franz DEIX  
Baukanzlei der MA 38, Wien

In Wien wird derzeit beim U-Bahn-Bau die "Neue Österreichische Tunnelbaumethode", natürlich auf innerstädtisches Lockergebirge angepaßt, ausgeführt. Die Grundgedanken der NÖT haben natürlich auch für dieses, aus rolligen bis stark bindigen Sanden, Kiesen und Schluffen bestehende Lockergebirge volle Gültigkeit. Es werden wohl Verformungen des Bodens zur Erzielung eines möglichst optimalen Mittragens dieses Mediums zugelassen, jedoch muß das Schwergewicht auf die Minimierung der Setzungen an der neben und über der U-Bahn-Trasse liegenden Bebauung gelegt werden. Damit kommt der raschen und tragfähigen Sicherung der vorgetriebenen Hohlräume besondere Bedeutung zu. Die Sofortsicherung erfolgt mit Ausbaubögen und 20 cm Spritzbeton bei eingeleisigen bzw. 25 cm bei zweigleisigen Streckenröhren.

Die im Zuge der Ausschreibungsplanung durchgeführten chemischen Analysen des Grundwassers zeigten, daß bei der Bauausführung ein besonders hoher Sulfatgehalt Berücksichtigung finden muß. Die Werte liegen bis 950 mg/l im Bauabschnitt U6/1 (Pottendorfer Straße) und im nächsten Bauabschnitt U6/3 (Vivenotgasse) sogar bis 1700 mg/l.

Da die Spritzbetonaußenschale relativ lange die einzige Sicherung des Hohlräume darstellt, bevor schließlich die aus wasserundurchlässigem Beton bestehende Innenschale hergestellt wird, muß jederzeit eine einwandfreie Sicherung gewährleistet werden. Diese erfordert die Vorschreibung eines sulfatbeständigen Spritzbetons der Mindestgüte B 225 durch den Bauherrn, der Magistratsabteilung 38. Die in Abbildung 1 dargestellte Kurve zeigt die der Ausschreibung beigelegten Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung.

Im Zusammenarbeit mit Dr. Huber und im weiteren Verlauf auch mit Prof. Lukas, die auf dem Gebiet der Erzielung sulfatbeständiger Spritzbetone umfangreiche Untersuchungen durchgeführt haben, war die Zielsetzung für Wien bald fixiert. Der Grundgedanke bestand in der Minimierung der den Sulfatangriff begünstigenden chemischen Bestandteile im Zement und im Erstarrungsbeschleuniger, nämlich Tricalciumaluminat und wasserlösliche Aluminate, auf ein unschädliches Ausmaß. Gleichzeitig mußten jedoch geeignete Zusatzmaßnahmen getroffen werden, um die vorgegebene Mindestfestigkeitsentwicklung gesichert einzuhalten.

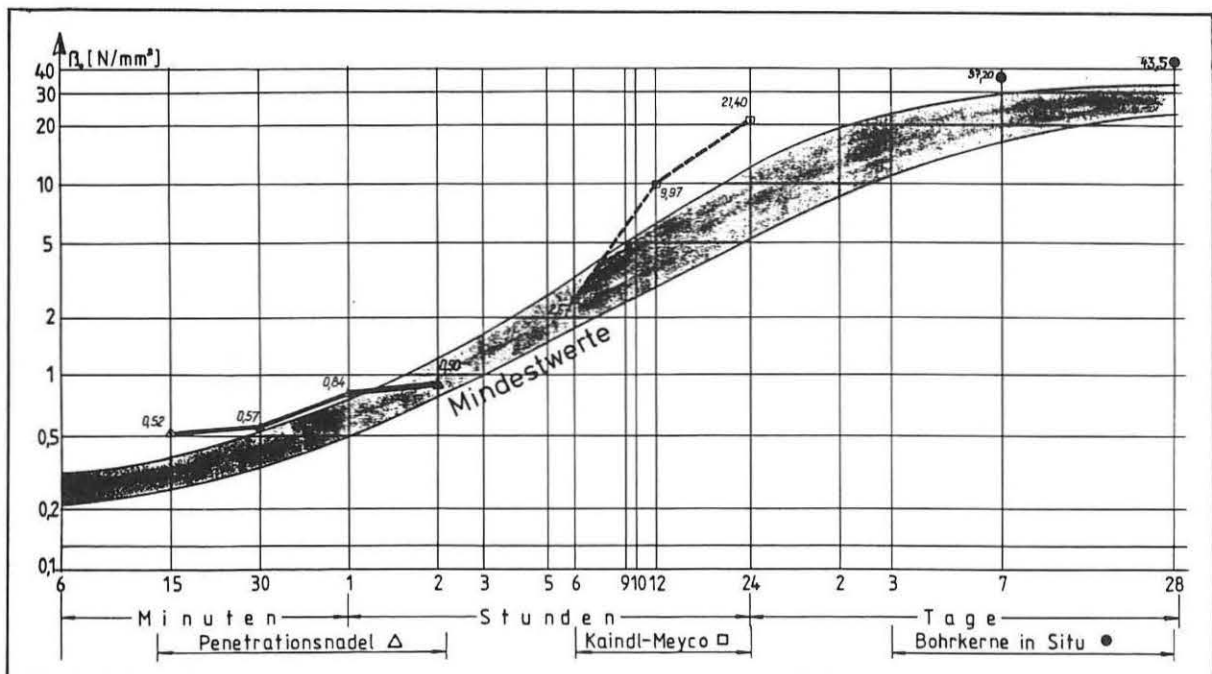


Abb. 1. Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton B 225.

Die wichtigste Komponente war der Zement, der anfänglich in der geforderten Gleichmäßigkeit und Qualität im Wiener Raum noch nicht zur Verfügung stand. In ausgezeichneter Zusammenarbeit mit den Perlmoser Zementwerken konnte jedoch schon bald ein vollkommen befriedigendes Ergebnis erzielt werden, dessen Produkt der Tunnelzement mit der Bezeichnung Contra-gress PZ 375 war. In diesem Zement sind die Mahlfeinheit mit einem Schwankungsbereich von  $\pm 150 \text{ cm}^2/\text{g}$  bei einem Blaine-Wert von etwa  $3900 \text{ cm}^2/\text{g}$ , weiters das Bluten, die Druckfestigkeit und ein gleichmäßiger Erstarrungsbeginn exakt definiert. Der Tricalciumaluminat-Gehalt ist gleich Null. Dieser Zement wurde vom Bauherrn in der Ausschreibung den Firmen vorgegeben. Auch für den Zuschlag 0/16, der getrennt in Korngruppen möglichst genau nach der Sieblinie B 16 beigegeben werden muß, ist im Bereich bis 0/4 die Schwankung genau festgelegt worden.

Im Zuge der Eignungsprüfung wurden dann Versuche mit erstarrungsbeschleunigenden Zusatzmitteln, die ausschließlich flüssig beizugeben waren, gemacht. Dabei wurde nicht nur das Zusammenwirken mit dem beschriebenen Zement hinsichtlich Erstarrungsbeschleunigung, Frühfestigkeit und Festigkeitsminderung nach 28 Tagen, sondern natürlich die Sulfatbeständigkeit überprüft. Nach mehreren Anpassungsvorgängen brachte die flüssige Spritzhilfe Barra-gunit F 91 das gewünschte Ergebnis.

Um die Endfestigkeit und auch die Dichtigkeit des Spritzbetongefüges sicherzustellen, wird außerdem vermahlene Flugasche dem Trockengemisch beigegeben. Die Flugasche, ca.  $35 \text{ kg}/\text{m}^3$  Spritzbeton, ersetzt dabei  $35 \text{ kg}$  Zement, so daß der Bindeanteil unverändert gleich gehalten werden kann. Unter diesen Voraussetzungen wird heute im Wiener U-Bahn-Bau, wie in den Ausführungen von Dipl.-Ing. Jodl detailliert erläutert wird, zielsicher die gewünschte Spritzbetongüte vor Ort eingebaut.

Diese ausführliche Beschreibung sollte die Voraussetzungen für den Spritzbetonversuch mit Stahlfasern aufzeigen. Immer wieder wurde von den Stahlfaser-Lieferanten und auch in Veröffentlichungen auf die Zukunftschancen von Stahlfaserspritzbeton hingewiesen. Um für weitere Ausschreibungen von U-Bahn-Bauabschnitten nach der NÖT bzw. zur Beurteilung von Variantenangeboten hinsichtlich Verarbeitung, Einbau, Tragverhalten und Prüfwerten Aufschluß zu erhalten, wurde in Bauabschnitt U6/1 ein umfangreicher In-situ-Versuch durchgeführt. Auch die Wirtschaftlichkeit sollte dabei beurteilt werden.

Zunächst mußte mit einer angenommenen Biegezugfestigkeit des Stahlfaserspritzbetons von  $7,5 \text{ N}/\text{mm}^2$  im Bruchzustand, bei Zugabe von etwa  $60 \text{ kg}$  Fasern auf  $1 \text{ m}^3$  Spritzbeton, die Sicherheit nachgewiesen werden. Der Versuch, durchgeführt im eingleisigen Streckentunnel ( $37 \text{ m}^2$  Querschnitt), sollte möglichst ohne den üblichen Einbau einer Lage Baustahlgitter AQ 60 erfolgen, um auch durch Konvergenzmessungen Aufschluß auf die Steifigkeit der Außenschale und eindeutige Vergleiche mit Spritzbeton zuzulassen. Die überschlägige Rechnung ergab bei einem größten Ulmenmoment von  $49 \text{ KNM}/\text{M}$  eine Sicherheit von 2,5 - 3 und lag damit deutlich über dem vorher festgelegten Grenzwert von 2,0. Es wurde lediglich in der Kalotte im Abstand von 1,0 m der übliche Ausbaubogen gestellt. Da im Firstbereich Sande und rollige Kiese anstanden, wurde Abschlag für Abschlag, außerdem auch ein voller Verzug eingebaut.

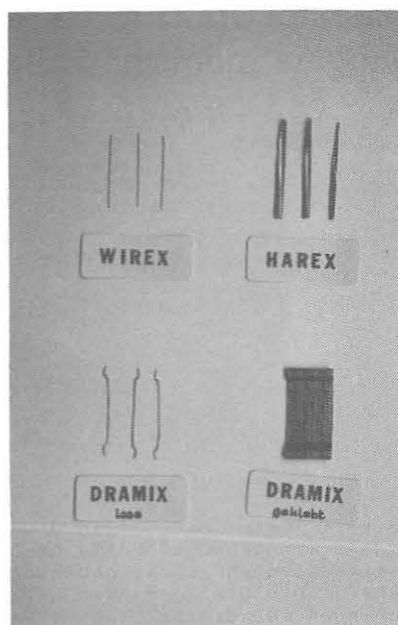


Abb.2. Die verwendeten Stahlfasern.

Mit folgenden Stahlfasern wurden dann jeweils 2 Abschlüge zu je 1 m gespritzt:

#### Harex-Stahlfasern

im Fräsvorgang aus Stahlblöcken hergestellt; sichelförmiger Querschnitt, verschieden breit, 30 mm lang.

#### Wirex-Stahlfasern

aus blankem, gezogenem Stahldraht; glatte, zylindrische Form, 25 mm lang, Durchmesser 0,4 mm.

#### Dramix-Stahlfasern

aus blankem Draht mit abgewinkelten Enden; 30 mm lang, Durchmesser 0,5 mm. Einsatz von zwei Typen: Einzelfasern lose und zu Streifen verklebte Fasern, die sich durch Eigenfeuchte des Zuschlagstoffes und durch den Mischvorgang vereinzeln.

Die Baustellenspritzbetonanlage befand sich auf der Geländeoberfläche neben dem Anfahr-schacht. Um die Stahlfasern beizugeben, wurde eine Entwirr- und Dosiereinrichtung der Firma Meynadier RIG 030 E zusätzlich aufgestellt. Die Förderleitung in den Schacht und vor Ort bis zur Düse war etwa 70 m lang und bestand aus Panzerschläuchen  $\varnothing 65 \text{ mm}$ . Schwierig in der zeitlichen Abfolge gestaltete sich der ringweise Einbau der gleichen Fasern, da das Voreilen der Kalotte dauernde Umstellungen erforderlich machte. Die Versuchsdurchführung war weiters durch zahlreiche Probeentnahmen stark behindert, so daß für den Ringschluß des 8 m langen Tunnels eine Woche benötigt wurde. Außerdem wurde auch der Einfluß verschiedener Körnungen des Zuschlagstoffes untersucht. Es kam Zuschlag 0/8 und 0/16 mm zum Einsatz.

Nun sollen vor den Prüfergebnissen die beim Versuch gewonnenen baupraktischen Erfahrungen aufgezeigt werden:

Um über die Größenordnung des Verschleißes von Geräten und Schläuchen eindeutige Aussagen zu treffen, waren die 8 m Tunnel zu we-

## 1. BAUWERKSSPRITZBETON

Stahlfasertyp ca. 60 kg/m <sup>3</sup> Faserteil	Zuschlagstoff	Probenalter Tage	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Druck- festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Spaltzug- festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Biegezug- festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Statischer E-Modul N/mm <sup>2</sup>
ohne Fasern	0/16	3	2324	32,1	3,68	6,61*	22446
		7	2315	35,6	4,08	8,40*	23800
		28	2329	41,5	4,73	9,13*	26400
Harex	0/16	3	2369	34,4	3,83	7,60*	23479
		7	2367	36,5	3,71	7,40*	26145
		28	2361	47,7	4,26	8,50*	23919
Wirex	0/16	3	2362	34,6	3,58	7,20*	24400
		7	2371	36,9	4,28	8,50*	27663
		28	2351	50,7	4,14	8,30	25414
Dramix I	0/16	3	2373	36,6	4,08	8,20*	23700
		7	2362	32,0	3,61	7,20*	27090
		28	2335	45,0	4,43	8,90*	26560

\* mit Verhältniszahl 2,0 aus Spaltzugfestigkeit umgerechnet

## 2. SPRITZBETONKENNWERTE AUS PROBEKISTCHEN

Stahlfasertyp ca. 60 kg/m <sup>3</sup> Faserteil	Zuschlagstoff	Probenalter Tage	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Druck- festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Spaltzug- festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Biegezug- festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Verhältnis Biegezugfestigkeit Spaltzugfestigkeit
Harex	0/16	7	2405	36,2	3,44	7,8	2,26
Wirex I	0/16	7	2382	36,1	3,50	7,7	2,19
Wirex II	0/8	7	2364	33,3	3,40	8,1	2,37
Dramix I	0/16	7	2369	34,0	3,80	8,2	2,14
Dramix II	0/8	7	2378	32,3	3,50	6,7	1,94

Tabelle 1. Kennwerte von Spritzbeton mit und ohne Fasern, gemessen an Bohrkernen und an 7 Tage alten Proben.

nig. Es wurden etwa 60 m<sup>3</sup> Stahlfaserspritzbeton vor Ort gefördert und gespritzt. Es zeigten sich an der Reibscheibe des Trockenmischgerätes deutliche Rillen, und außerdem kam es zum Platzen eines vorher neuen Schlauches, der stark gekrümmt am Übergang Schacht/Tunnel angeordnet war. Die Dosierung über die rotierende Trommel der Entwirreinrichtung bedarf einer gleichmäßigen Beschickung der Trommel. Da das Personal hierauf nicht ausreichend geschult war, zeigte sich bei den glatten Fasern Dramix und Wirex eine Streuung des Fasergehaltes in der Trockenmische und schließlich auch im Spritzbeton. Die Harex-Fasern waren ohne die oben erwähnten Probleme im richtigen Verhältnis dosiert. Weiters wurde versucht, alle Fasern, genau auf die Mische abgestimmt, ohne Entwirrgerät im Zwangsmischer beizugeben. Hier zeigte sich, daß die anfangs geklebten Dramix-Fasern einwandfrei ohne Knäuelbildung bis zur Düse gefördert wurden. Auch die gefrästen Fasern (Harex) zeigten ein gutes Ergebnis. Die anderen Fasern bildeten die gefürchteten Igel schon vor der Trockenmischmaschine.

Ein wesentlicher Vorteil des Stahlfaserspritzbetons zeigte sich dann beim Auftragen vor Ort. Es konnte nach dem Stellen des Ausbaubogens in der Kalotte die gesamte Stärke

von 15 cm bzw. in der Strosse und Sohle von 20 cm in einem Arbeitsvorgang gepritzt werden. Der Rückprall wurde hinsichtlich Faseranteil und Menge untersucht. Dabei wurde sowohl im Rückprall als auch im aufgetragenen Spritzbeton der gleiche anteilige Fasergehalt wie in der Trockenmische festgestellt. Der Rückprall selbst war geringfügig größer als bei herkömmlichem Spritzbeton, wobei die Zunahme in der Kalotte geringer als im Strosenbereich war. Rückschlüsse des Einflusses der einzelnen Fasertypen auf den Rückprall konnten zufolge des hierfür zu kleinen Versuchsrahmens nicht eindeutig belegt werden.

Die Kennwerte der mechanisch technologischen Prüfung sind in den beiden abgebildeten Tabellen zusammengestellt.

Die obere Tabelle enthält die Ergebnisse des Spritzbetons ohne Fasern und der Stahlfaserspritzbetone aus Bohrkernen, die (Durchmesser 10 cm) von der Außenschale der Streckenröhre entnommen wurden.

Die untere Tabelle zeigt das Ergebnis der Prüfung des 7 Tage alten Stahlfaserspritzbetons aus den Probekistchen.

Beide Tabellen stimmen in den vergleichbaren Kennwerten, nämlich der Rohdichte, der Druckfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit gut überein, so daß eine Umrechnung der Biegezugfestigkeiten aus der Spaltzugfestigkeit in Tabelle 1 mit einer Verhältniszahl einwandfrei möglich ist. Aus dem Untersuchungsergebnis der Tabelle 2 ist ersichtlich, daß 2,0 als Verhältniszahl durchaus realistisch ist. Der Wert von 1,94 bei den geklebten Fasern von Dramix ist an Hand der Besichtigung der Probe auf nicht gute Verteilung der Stahlfasern zurückzuführen und daher nur mit Vorbehalt zu betrachten. Die Biegezugfestigkeit liegt damit ausreichend sicher zwischen 8,3 und 8,9 N/mm<sup>2</sup>.

Interessant sind auch die Vergleiche mit dem Nullbeton. Der extrem gute Zuschlagstoff im Wiener Raum, dessen Quarzanteil bis zu 95 % beträgt, bewirkt vor allem diese hohe Qualität. Der mit Stahlfasern versehene Spritzbeton zeigt nur unwesentlich bessere Werte. Weiters konnte festgestellt werden, daß bei der Biegezugprüfung im Bruchzustand auch die Harex-Fasern gebrochen waren. Wirex- und Dramix-Fasern wurden herausgezogen. Bei der Spaltzugprüfung wurde mit Harex-Fasern wieder das gleiche Ergebnis erzielt. Die Probe zerfiel daraufhin in zwei Teile. Die Proben mit Wirex- und Harex-Fasern zeigt ein Schlupfen der zylindrischen Fasern beim Bruch des Betons, jedoch blieben die beiden Probehälften durch die Fasern weiterhin verbunden. Die beiden Bruchkörper konnten auch bei erheblicher Kraftanwendung nicht getrennt werden.

Auch die Entwicklung des statischen E-Moduls von Stahlfaserspritzbeton im Vergleich zum Nullbeton ist bemerkenswert. Die 3-Tage-Werte liegen im Mittel um etwa 5 %, die 7-Tage-Werte gar um mehr als 10 % höher. Nach 28 Tagen sind die Werte für den E-Modul des Stahlfaserspritzbetons deutlich unter den Ergebnissen nach 7 Tagen und bis auf Dramix-Fasern

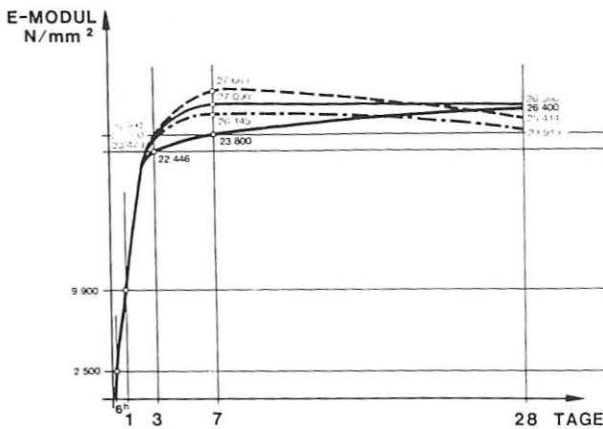


Abb. 3. Entwicklung des E-Moduls.

Spritzbeton —————  
 Stahlfaserspritzbeton - - - - -  
 Dramix .....  
 Wirex - · - · -  
 Harex - - - - -

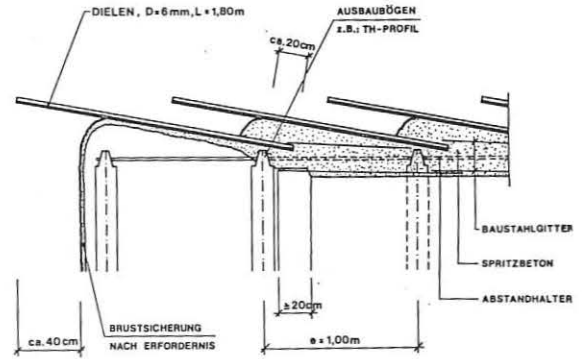


Abb. 4. Voll vorgepfändeter Verzug.

auch unter dem des Nullbetons. Diese Entwicklung wurde an einer größeren Serie von Proben eindeutig festgestellt. Die Prüfung erfolgte für Nullbeton und Faserbeton in der gleichen Art, mit denselben Präzisionsgeräten einer 20 KN-Stückprüfmaschine der Güteklasse I der Versuchs- und Forschungsanstalt der Gemeinde Wien. Hinsichtlich dieser Entwicklung des E-Moduls bei Faserzugabe wurden inzwischen Überlegungen über die Ursachen des Abfalls angestellt, jedoch noch keine eindeutige Klärung dieses Phänomens erzielt.

Abschließend noch einige Worte zur Möglichkeit des Einsatzes des Naßspritzverfahrens und von Betonspritzmanipulatoren bei der NÖT im Wiener U-Bahn-Bau.

Durch den Arbeitsablauf und durch die richtige Anwendung der Sicherungsmaßnahmen, wie zum Beispiel bei der Anwendung von voll vorgepfändeten Verzugsblechen, ist ein immer wieder kurzzeitiges Spritzen mit kleinen und kleinsten Mengen Spritzbeton erforderlich. Dies würde beim Naßspritzen durch die dauernden Unterbrechungen erhebliche Verluste in den Förderleitungen zufolge der erforderlichen Entleerung und Reinigung zur Vermeidung von Stopfern verursachen. Damit wäre ein erheblicher Mehraufwand an Material und Arbeit verbunden.

Die zur Verfügung stehenden Ausbruchsflächen sind auch im zweigleisigen U-Bahn-Tunnel durch die Unterteilung in Teilausbrüche mit voreilender Kalotte für den wirtschaftlichen Einsatz von Manipulatoren zu klein. Außerdem ist für das kleinräumige Hinterspritzen von Sicherungsmaßnahmen ein genau gezielter Spritzbetonstrahl erforderlich, der nur durch eine händische Düsenführung ohne erhebliche Rückprallsteigerung möglich erscheint. Auch hinsichtlich der Spritzschatten hinter den im Abstand von 1,0 m angeordneten Ausbaubögen bestehen bei Manipulatoreinsatz Bedenken.

Dies würde bedeuten, daß, wenn überall schon Roboter und Manipulatoren die menschliche Arbeitskraft ersetzt haben, beim Wiener U-Bahn-Bau noch echte Mineure ihr Handwerk ausüben werden.