

---

# Spritzbetonanwendung unter schwierigen Verhältnissen beim Projekt 'Russia Wharf Tunnel' in Boston, USA

---

## APPLICATION OF SHOTCRETE UNDER EXTRAORDINARY CONDITIONS AT THE 'RUSSIA WHARF TUNNEL' IN BOSTON, USA

### NORBERT FÜGENSCHUH

Zwischen September 2002 und Oktober 2003 wurden die Bauarbeiten des Projektes 'Russia Wharf Tunnel' in Boston, USA ausgeführt. Dabei kam das Trockenspritzverfahren sowohl für die Herstellung der Außenschale, als auch für die stahlfaserbewehrte Spritzbeton- Innenschale zur Anwendung. Die innenstädtische Lage der Baustelle in Hafennähe, sowie die Auffahrung des Tunnels in künstlich vereistem Baugrund unterhalb mehrerer historischer Gebäude stellten besondere Bedingungen an das Spritzverfahren. Der Beitrag beschreibt das im Vorfeld durchgeführte Versuchsprogramm, die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis, sowie die Bewältigung der Probleme in der realen Anwendung. Neben den besonderen Vortriebsverhältnissen wird der Erstellung der Spritzbeton- Innenschale spezielles Augenmerk gewidmet.

*The construction works at the 'Russia Wharf Project' in Boston, USA have been performed between September 2002 and October 2003. The dry-mix shotcrete method has been used not only for the shotcrete for the initial support, but also for installation of the steel fiber reinforced inner lining. The location of the construction site close to the Boston Downtown and the harbour area and the excavation of the tunnel in artificially frozen ground underneath historic buildings created special problems for the shotcreting process.*

*The paper describes the shotcrete pretesting program, the process of transferring the pretest results to the actual practical application and of course the methods how the problems of the construction site could be solved. Besides the tunnel excavation the special problems during installation of the SFRS-inner lining will be highlighted.*

#### 1. Allgemeines

In Boston / USA wird zur Zeit "als Nebenschau- platz" des 14,6 Mrd. \$-Megaprojektes Central Artery ("The Big Dig") auch das U-Bahn Projekt Silverline verwirklicht. Die Silverline stellt im End- zustand eine mit Bussen befahrene U-Bahnstrecke

vom Logan International Airport in die Innenstadt dar.

#### 2. Das Projekt

1999 wurde das Projekt Russia Wharf ausgeschrieben und umfasste neben einem ca. 150 m langen

Immersed Tube Tunnel durch den Fort Point Channel und zwei offenen Cut&Cover-Bereichen auch 100 m NATM-Tunnel (NATM = New Austrian Tunneling Method = Neue Österreichische Tunnelbauweise = NÖT).

Bereits zum Zeitpunkt der Kalkulation des Bauloses Russia Wharf Tunnel war klar, dass diese Baumaßnahme außergewöhnliche Anforderungen an die Baumethode NATM und den dabei zu verwendenden Spritzbeton stellen würde. Der Ausschreibungsentwurf der Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA), erstellt u.a. vom Büro Dr. Sauer, sah die Unterfahrung mehrerer historischer und während der Bauzeit in Benutzung befindlicher Gebäude am Rand der Innenstadt von Boston vor (Bild 1).



Bild 1: Lage der Baustelle

Der ca. 20 m tiefe Spundwand-Startschacht für die Tunnelbaumassnahme kam auf ein in unmittelbarer Nähe des Fort Point Channels, gelegenes Grundstück zu liegen (Bild 1). Die Linienführung des Tunnels führte dann mit einer steigenden Gradienten von 3,25 % unter die Gebäude, wobei die verbleibende Überdeckung zu den Fundamenten teilweise nurmehr 3 m betrug.

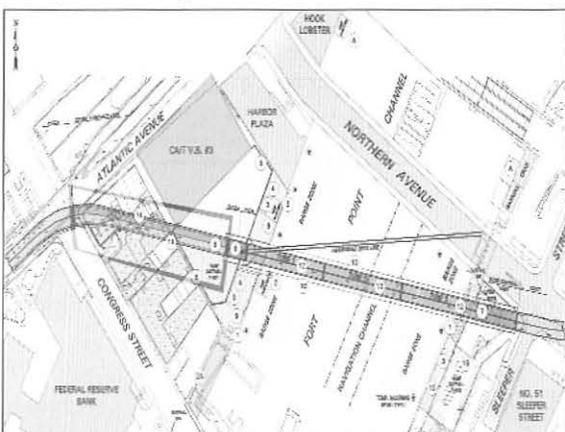


Bild 2: Schematische Darstellung der Gesamt-Baumaßnahme (NATM-Abschnitt im Rahmen)

Verkompliziert wurde die Baumassnahme dadurch, dass die Gründung der Einzelfundamente der Gebäudestützen über Granitblöcke erfolgte, die ihrerseits die Last über gerammte Holzpfähle in den Baugrund leiteten. Diese Reibungspfähle wurden durch den Tunnelvortrieb abgetrennt und deren Last mittels spezieller "Schuhkonstruktionen" auf die Spritzbetonschale umgelagert (Bild 5). Seitens der Planung wurde darüber hinaus quasi als zusätzliches Sicherheitsmoment ein Gewölbe-Tragring aus künstlich vereistem Baugrund vorgesehen.

Das Gefrieren des Bodens erfolgte über vertikal vom Gebäudekeller gebohrte Gefrierlanzen (Bild 3), die dann in einem geschlossenen Kreislauf mit einer ca. -35 Grad kalten Solelösung aus Calciumchlorid durchströmt wurden. Der gesamte Gefriervorgang dauerte ca. 6 Monate, wobei dessen Entwicklung und Zustand mit einzelnen Temperaturmesslanzen überwacht wurde. Das anstehende Grundwasser wurde mit einer ebenfalls im Gefrierverfahren hergestellten Cut-off-wall ferngehalten.

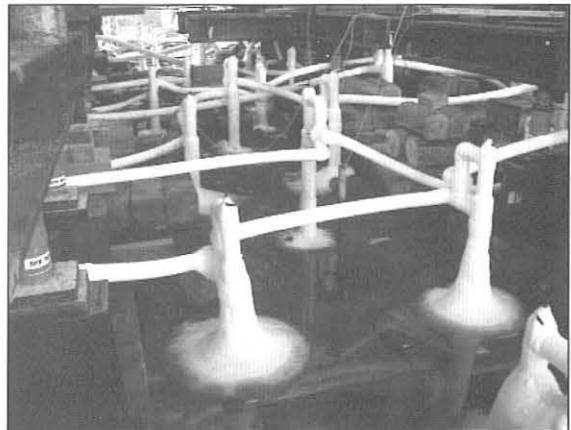


Bild 3: Vertikale Gefrierlanzen im Gebäudekeller

Nachdem die vorliegende Präsentation in erster Linie dem Spritzbeton gilt, kann das äußerst komplexe System mit dem die abzutragenden Gebäude lasten auf dieser Baustelle behandelt wurden, nur angerissen dargestellt werden. Hier wird auf [1] verwiesen.

Der in Bild 4 abgebildete NATM-Querschnitt zeigt den Endzustand.

Die Abfolge der NATM-Arbeiten erfolgte - angelehnt an die Bochumer Bahnhofsbaubauweise - in folgender Reihenfolge:

1. Vortrieb Outbound Röhre (Kalotte durchlaufend/ danach Strosse und Sohle)
2. Ortbeton der Sohle Outbound Röhre
3. Ortbeton Mittelwand

4. Innenschale Gewölbe Outbound Röhre
5. Vortrieb Inbound Röhre (Vollausbruch mit abgetrepter Ortsbrust)/ Herstellung der bei Ausbruch der Outboundröhre vorbereiteten Bewehrungs-Anschlüsse in der Firste und Sohle
6. Mittlaufend Abbruch der Innenulme der Outbound Röhre
7. Sohleinbau Inbound Röhre
8. Gewölbe Innenschale Inbound Röhre

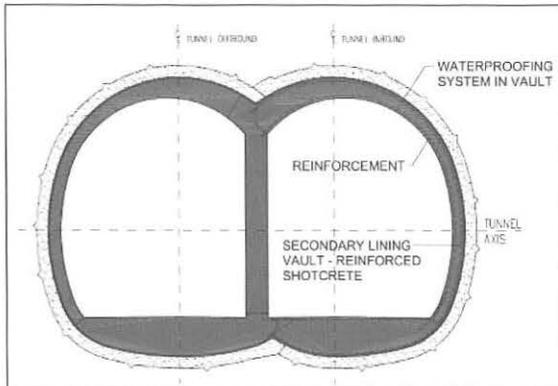


Bild 4: Endzustand Russia Wharf NATM-Tunnel

Die im NATM-Tunnel während des Vortriebes designkonform einzubauenden Stützmittel bestanden aus:

- 5 cm stahlfaserbewehrtem Versiegelungs-Spritzbeton, sog. flashcrete
- speziellen Bewehrungskörben (mit sternförmiger Anschlussbewehrung an die erste Lage der Außenschale) zur Umfassung der freigelegten und abgeschnittenen Holzpfähle der Pfahlfundierung (Bild 5).
- 30 cm Spritzbeton, mit 2 Lagen Bewehrungsmatten der amerikanischen Bezeichnung 6x6W 8xW8 (entspricht ca. 5,8 cm<sup>2</sup>/m) bewehrt, wobei die theoretisch ca. 50 cm tiefen ‚Taschen‘ um die Holzpfähle mit der ersten Spritzbetonlage mit auszuspritzen waren. Dieses Zuspritzen hatte durch

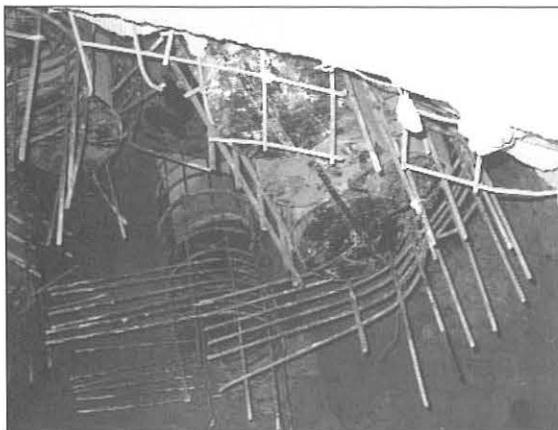


Bild 5: Holzpfähle der Gebäudefundierung mit entsprechender Umfassungsbewehrung (Blick in die Firste des Tunnels)

mehrere Lagen Bewehrung hindurch zu erfolgen, was in der Praxis eigentlich nicht möglich war. Aus diesem Grund wurden in der Ausführung letztlich Verfüllelemente in Form von Stahlrohren mit eingespritzt, über die später die möglicherweise bestehenden Hohlräume verfüllt werden konnten (Bild 5).

- Einbau von Spießen im Anfahrbereich und im sogenannten Atrium-Abschnitt zwischen den beiden Gebäuden, sowie in vorher nicht bekannten Bereichen mit unplanmäßigen Wasserzutritten oder unerwartet schlechten Bodenverhältnissen.

### 3. Anforderungen an den Spritzbeton

Die Anforderungen an das zum Einsatz kommende Spritzbetonsystem ergaben sich aus folgendem Forderungskatalog:

- der Spritzbetonauftrag erfolgte auf gefrorene Oberflächen mit zu erwartenden Bodentemperaturen von unter -10 °C auch im Überkopfbereich (Bild 6)
- innenstädtische Lage der Baustelle mit einer möglichen Zufahrt nur über die Bostoner Hauptverkehrsadern Interstate I 93 und Atlantic Avenue - mit zu erwartenden Problemen bei Betonanlieferungen speziell in Zeiten der Rush-hours in der Früh und am Abend, sowie Transportproblemen an Sonn- und Feiertagen - Verkehrssituation verschärft durch weitere Großbaustellen in der unmittelbaren Umgebung
- Frühfestigkeitsanforderung 17,5 MPa nach 24 Stunden, somit höher als Anforderung JIII nach der Österreichischen Richtlinie für Spritzbeton
- Festigkeitsanforderung 35 MPa nach 28 Tagen während der Ausführung
- Anforderungen an den Stahlfaserspritzbeton:
  - Nachrisszugfestigkeit (Residual strength factor):  $R_{20, 50}$  nach 7 Tagen > 40
  - First crack flexural strength nach 7 Tagen: > 5 MPa
- Berücksichtigung der Möglichkeit einer Alkali-Silika-Reaktion
- Erstmalige Anwendung des Bauverfahrens NATM im Nordosten der USA. Dadurch weitgehend NATM-unerfahrenes örtliches Personal
- Übergabestelle an Geländeoberfläche - Einbaustelle ca. 20 m tiefer im Tunnel/ somit notwendiger Vertikal und Längstransport mit einer Endlänge von ca. 150 m.
- Gesamtmenge Spritzbeton für die Aussenschale nur ca. 3.000 m<sup>3</sup>
- teilweise extreme Witterungseinflüsse (Lufttemperaturen, Luftfeuchtigkeit)
- sehr geringe Spritzmengen pro individuellem Spritzvorgang

- bei Wasserzutritten / schlechten Bodenverhältnissen / Fehlstellen im Gefrierkörper die Notwendigkeit rasch reagieren zu können



Bild 6: Vereister Baugrund im Kalottenvortrieb

In der Ausschreibung war die Verwendung von Naßspritzbeton vorgesehen. Nicht zuletzt aufgrund des zuletzt genannten Kriteriums "rascher Stützmitteleinbau in möglichen Notsituationen" und der geringen Spritzmengen pro Einzelspritzvorgang stimmte der Auftraggeber der Verwendung des Trockenspritzverfahrens zu.

### 3.1 Ausstattung der Baustelle

Die Wahl fiel letztlich auf das Trockenmischsystem Mixomat II der Firma PHS aus Lassing. Das zwei-bahnige System arbeitet mit vorgemischten, erdfeuchten Zuschlagstoffen. Dabei ist neben der Sieblinie auf die Eigenfeuchte zu achten, die in jedem Fall im Bereich von minimal 2,0 % bis maximal 3,5 % liegen sollte, um weder mit übermäßiger Staubentwicklung, noch mit Stopfern Probleme zu bekommen.

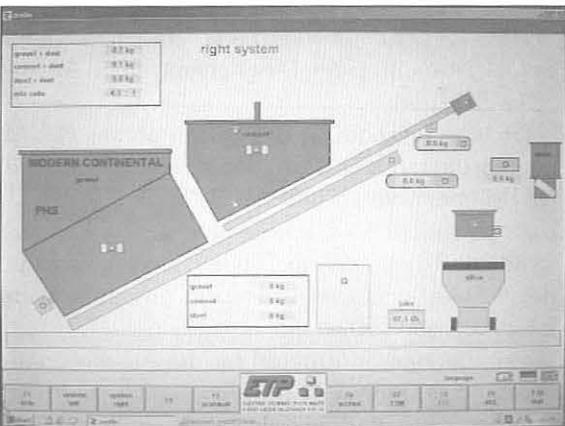


Bild 7: Schematische Darstellung der Spritzanlage (Bildschirm der Fernübertragung mittels LWL-Kabel)

Das System wird in Mitteleuropa normalerweise in Kombination mit Tunnelzement verwendet, der die zusätzliche Verwendung von Beschleuniger unnötig macht. In den USA ist diese Art Zement unbekannt und es war somit erforderlich das Problem Beschleuniger / Beschleunigerdosierung genau zu durchdenken.

### 3.2 Funktionsweise des gewählten Systems

Zement- und Zuschlagdosierung erfolgen bei diesem System gewichtsdosiert über elektronische und kalibrierte Wiegebänder. Das Gewichtsverhältnis Zuschlagstoff : Zement muss vorbestimmt und eingestellt werden. Verwogener Zement und verwogener Zuschlagstoff fallen gemeinsam durch einen so genannten Kammischer in den Fülltrichter einer der beiden Spritzmaschinen vom Typ Aliva 263. Von dort erfolgt der Fördervorgang des erdfeuchten Mischgutes dann pneumatisch über 2 Stahlleitungen DN 65 mm zur Düse an der Ortsbrust, wo Anmachwasser und Beschleuniger vom Düsenführer zugegeben werden.

Als zusätzliche technische Ausrüstung wurden bei der Anlage Boston eingebaut:

- Stahlfaserdosieranlage
- Automatische Zementfüllanlage gesteuert über Sensoren, die bei Absinken des Zementstandes im Mixomat II-Silo die Förderschnecke vom Vorrats-silo starteten
- Daten-Fernübertragungssystem (Bild 7): Dieses erlaubte dem Bauleiter mittels Lichtwellenleiter vom PC im Containerbüro aus den Spritzvorgang zu beobachten. Die aufgenommenen Daten wurden zu Dokumentationszwecken aufgezeichnet und elektronisch gespeichert.

### 3.3 Stahlfaserdosieranlage

Bei einem kontinuierlich fördernden System kann keine herkömmliche Waage zur Dosierung der Fasern eingesetzt werden. Es war also die Einführung und Kalibrierung eines ebenfalls kontinuierlichen Zugabesystems für die Stahlfasern notwendig. Beim gewählten System Incite (Bild 9) hängt die Förder-rate von der Rüttelfrequenz ab, mit der der Behälter beaufschlagt wird. Daneben beeinflusst auch der Füllungsgrad des Behälters die Ausstoßrate, was aber bei Einhaltung eines gewissen Füllhöhenbereiches vernachlässigt werden darf.

Die tatsächliche Förderrate der Spritzbetonanlage wurde rückgerechnet und daraus die notwendige Dosierfrequenz der Incite-Stahlfaserdosierung bestimmt um die gewünschten 60 kg/m<sup>3</sup> Fasern tat-

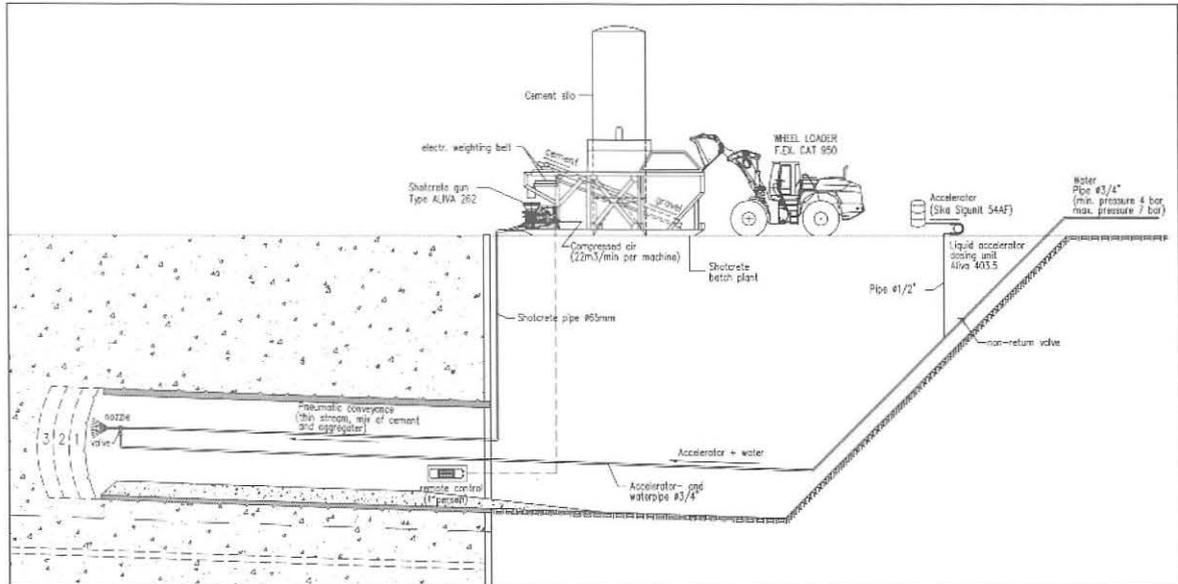


Bild 8: Schematische Darstellung des Spritzbetonkonzeptes

sächlich gesichert zu dosieren. Während der Bauausführung musste diese Rückrechnung stichprobenartig wiederholt werden, um die richtige Dosierrate gewährleisten zu können.



Bild 9: Stahlfaserdosieranlage neben Steuerpult der Spritzanlage

#### 4. Spritzbeton-Vorversuche

Im Zuge eines Auswahlverfahrens wurden bereits weit im Vorfeld der Ausführung Versuche am Institut für Baustoffe und Bauphysik an der Uni Innsbruck durchgeführt mit dem Ziel optimale Beschleuniger-Zement-Kombinationen herauszufinden. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Zemente bzw. Beschleuniger konnte so für die später folgenden Feldversuche vor Ort in Boston auf 2 Zemente und 3 Beschleunigerprodukte reduziert werden. Etwa zwei Monate vor Vortriebsbeginn folgten diese Field trials, die bereits vor Ort im nahezu fertigen Startschacht stattfanden. Das letztlich ausgewählte Rezept hatte schließlich folgendes Aussehen:

- 380 kg/m<sup>3</sup> Zement Lafarge SF preblended (Zusatz von 7 % des Zementgewichts an Mikrosilika bereits werksseitig eingemischt), Werk St. Constant, Montreal, Canada
- 1790 kg/m<sup>3</sup> Zuschlagstoff zusammengesetzt aus 2/3 Sand Ossipee und 1/3 Gravel Swampskott 3/8", GK 11mm
- ca. 5 % Beschleuniger Sika Sigunit 54 AF/55 (die Angabe 55 bezieht sich auf die gewählte Produktkonzentration - Erklärung siehe unten)
- bei Stahlfaserspritzbeton: 60 kg Stahlfasern ZP 305 je m<sup>3</sup> im Trockenmischgut (der überproportionale Anteil der Fasern im Rückprall wurde bei diesem Wert bereits empirisch berücksichtigt)
- W/Z = 0,50
- Gewichtsverhältnis Zement : Zuschlagstoff = 1 : 4,7.

#### 4.1 Beschleunigerauswahl

Es konnte in den Vorversuchen kein überzeugendes amerikanisches bzw. in den USA produziertes Produkt gefunden werden. Im Hinblick auf die in Kombination mit dem gewählten Mixomat II-System einfacher mögliche Dosierung legten wir uns auf die Verwendung von Flüssig-BE fest. Unter Berücksichtigung der Problematik Alkali-Silikareaktion, der Arbeitshygiene und aus Umweltschutzgründen war die Verwendung von alkalifreiem BE-Mittel notwendig.

Die Auswahl eines Materials, das in Europa produziert wird, erschien nicht sinnvoll im Hinblick auf die entstehenden Transport-/ Zoll- und Dispositionsprobleme (wie weit im Vorfeld muss Bedarf geplant werden um das Material bei Schifftransport recht-

zeitig auf der Baustelle zu haben). Dazu kommt die relativ kurze Haltbarkeitsdauer dieser Materialien - garantiert wurde seitens der Hersteller zum Bauzeitpunkt lediglich 3 Monate, wovon der Schifftransport im allgemeinen schon mindestens 3-4 Wochen in Anspruch nimmt. Die Gefahr irgendwann ohne Material bzw. mit nicht mehr funktionierendem, abgelaufenem, Material dazustehen erschien als zu groß.

Die Alternative ergab sich in Form eines in Kanada eingekauften, in Indien produzierten Materials des Herstellers Sika, Materialbezeichnung Sigunit 54 AF/x, das auf der Baustelle aus Pulver und Wasser selbst gemischt wird. Die Herstellung des Flüssigbeschleunigers muss dabei idealerweise einige Stunden vor Anwendung erfolgen, der angemischte Beschleuniger ist dann für ca. 1 Woche stabil und kann wie herkömmliches Flüssig-BE-Mittel verwendet werden. Auf Frostsicherung muss nur beim angemischten Material geachtet werden, das trockene Pulver ist nicht frostempfindlich. Die Konzentration x (siehe Materialbezeichnung oben) des Flüssigbeschleunigers kann selbst gewählt werden, wird über das Gewichts-Verhältnis Pulver/ Wasser gesteuert und muss im Zuge der Vorversuche optimiert werden.

Die Methode mag unzeitgemäß und zu kompliziert erscheinen, erwies sich in der Anwendung jedoch unproblematisch und ich bin der fixen Überzeugung, dass dieses Konzept in vielen Ländern einen gangbaren Ausweg aus Transport-/ Dispositions-/ Haltbarkeits- und Frostproblemen darstellt. Alleine die Tatsache, dass lediglich Paletten mit trockenem Pulver anstelle hauptsächlich aus Wasser bestehenden Beschleunigers transportiert werden müssen, spricht bei weit entfernten Baustellen für sich.

Die Dosierung des Flüssig-BE erfolgte über 2 Aliva Dosierpumpen 403.5. Die innerhalb eines bestimmten Bereiches stufenlos verstellbare Pumprate war durch periodische Checks der tatsächlichen Förderrate der Spritzmaschinen einzustellen.

#### 4.2 Gesteinskörnungen

Die gewählte Sieblinie wurde zusammengesetzt aus 2/3 Ossipee Sand und 1/3 Swampskott gravel 3/8 " (11 mm GK).

Die eigentliche Mischung erfolgte in einem ca. 20 km entfernten Kies- und Asphaltwerk von Aggregate Industries. Auf der Baustelle wurden die vorge-mischten Zuschlagstoffe augenscheinlich geprüft und stichprobenartig deren Eigenfeuchte beprobt (Darrmethode). In der Praxis zeigte sich, dass der Lieferant eigentlich sehr gut in der Lage war die vertraglich abgesicherte Eigenfeuchte von 2,0 bis 3,5 % zu halten. Dies erforderte allerdings, dass bereits im

Kieswerk ein Regenschutz und im Winter ein Aufheizen der Ausgangsstoffe (auch zur Vermeidung der sonst auftretenden Frostverklumpungen) erfolgte. Auf der Baustelle wurden die erdfeuchten, gemischten Zuschläge dann mittels einer Zelthalle vor Witterungseinflüssen geschützt gelagert (Bild 10).

### 5. Sonstige Randbedingungen

#### 5.1 Temperaturproblematik

Es war davon auszugehen, dass der Spritzbeton in Teilen des Tunnels auf bis zu -15 °C kalte Gebirgs-oberfläche aufzutragen war. Dazu war bekannt, dass der Winter in Boston sehr streng sein kann und tatsächlich Lufttemperaturen mit bis zu -24 °C und mehrfache starke Schneefälle mit Schneemengen bis zu 75 cm gebracht hat. Auch Dauerfrostperioden bis zu 3 Wochen waren im Winter nicht selten. Es wurden folgende Heizmöglichkeiten realisiert:

- Heizung des Zuschlagstoffzeltes mittels Abluft der Elektrokompressoren (Bild 10).
- Heizung der Zuschlagstoffe in der Mixomat-Anlage mittels eingebauter Zuluftkanäle, die über einen handelsüblichen Gasheizungs-brenner mit Heißluft durchströmt wurden
- Heizung des Anmachwassers
- Einhausung und Heizung der gesamten Spritzanlage inkl. Beschleuniger-Mischstation (im vorliegenden Fall einfach, da der kurze Tunnel eine stationäre Aufstellung der Anlage am Schachtrand ermöglichte)



Bild 10: Stationäre Aufstellung der Komponenten der Spritzbetonanlage am Schachtrand

#### 5.2 Weitere Witterungseinflüsse

Während der Spritzbetonarbeiten bereitete die hohe Luftfeuchtigkeit in den Sommermonaten große Probleme. Eine zu hohe relative Feuchtigkeit in der

Förderluft bewirkt bei Entspannungsvorgängen ein Ausscheiden der Feuchtigkeit in Form von Wasser und dadurch bedingt kommt es in Kontakt mit dem Zement zu Verklumpungen. Die normalerweise angewendete Maßnahme der Reduzierung des Feuchtigkeitsgehalts der Förderluft mittels kleiner, in die Druckluftleitungen eingebauter, "Kondensations-töpfe" versagte in diesem Fall mangels Leistungsfähigkeit. Das Problem wurde schließlich durch zeitweisen Einsatz eines großen Luftentfeuchters aus der Stationärindustrie gelöst (Bild 11).



Bild 11: Luftentfeuchter Förderluft

## 6. Innenschale

### 6.1 Basisdaten des Amtsentwurfes

- Tunnelabdichtung mit vollflächiger 2 mm starker PE-Folie auf Geotextil
- Schottherstellung mittels außenliegender 6-stegiger Fugenbänder in Längs- und Querrichtung zur später möglichen Eingrenzung von Undichtigkeiten
- Innenschale  $d = 35$  cm in Ortbetonbauweise unter Verwendung von Stahl Schalung
- Geometriewechsel etwa bei Station 60 (Gesamt-tunnellänge: 100 m)
- enger Kurvenradius am Tunnelende
- Anschluss am Tunnelende an das bereits fertige Nachbarlos
- Anschluss am Tunnelanfang an die Cut&Coverbox der Offenen Bauweise des Startschachts
- schräg zur Tunnelachse verlaufende "Flat roof section" von Station 0 bis ca. 15 m die Notwendigkeit war bedingt durch ein zukünftig im Bereich des Startschachtes vorgesehenes Parkhaus eines Hotels, das den Abbruch der Außenschale der Tunnelkalotte in diesem Bereich vorsah (Bild 12):

Die vorgesehene Bauweise hätte also die Verwendung mehrerer Schalungen mit den erforderlichen

Umbaumaßnahmen notwendig gemacht. Bei Einzellängen der zu betonierenden Querschnitts-Abschnitte mit einheitlicher Innenschalengeometrie von maximal 30 bis 40 m (entsprechend 3 bis 4 Blöcke) und unerfahrenem Personal wäre ein vernünftiger Rhythmus der Arbeiten weder bei Bewehrungs- noch bei den eigentlichen Betonarbeiten möglich gewesen. Es lag also der Gedanke nahe mittels eines 'Value Engineering Proposals' (VECP) das System der Innenschale zum Vorteil aller Beteiligten zu verändern.

### 6.2 Value Engineering Proposal 'Inner Lining' (VECP)

Dem AG wurde in enger Abstimmung mit dem Designer schließlich ein System der folgenden Form vorgeschlagen:

- Abdichtungssystem bleibt unverändert
- Herstellung der Sohle und der Mittelwand erfolgen wie im AE vorgesehen in Ortbetonbauweise mit entsprechender Anschlußbewehrung aus der Sohle bzw. der Mittelwand
- Ausführung einer stahlfaserbewehrten Spritzbetoninnenschale  $d = 35$  cm mit noch festzulegenden Parametern für die Spritzbetoneigenschaften hinsichtlich End-Druckfestigkeit, Zähigkeitsindex und Erstrisszugfestigkeit
- Ausführung einer 5 cm starken Deckschicht aus unbewehrtem, zwecks Verbesserung des Brandschutzes mit 6 mm langen Polypropylenfasern versetztem Spritzbeton
- Reduzierung der Korngröße zur Schaffung einer optisch ansprechenden Oberfläche
- Einhaltung von Ebenflächigkeitskriterien

Zu den rein planerisch einzuhaltenden Kriterien kam noch die ausführungstechnische Notwendigkeit, dass das Grundrezept des Spritzbetons für Außen- und Innenschale dasselbe sein sollte. Dies

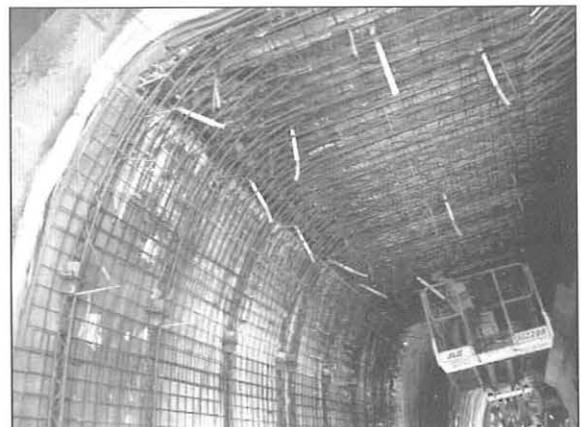


Bild 12: "Flat roof section" - Sonderprofil mit flacher Kalotte am Tunnelanfang

aus dem Grund, weil gleichzeitig zur Ausführung der Innenschale in der linken (Outbound)-Röhre noch die Vortriebsarbeiten in der rechten (Inbound)-Röhre liefen und die Herstellung des stahlfaserbewehrten Spritzbetons für die Innenschale sinnvollerweise mit derselben Spritzanlage erfolgen sollte. Die Verwendung unterschiedlicher Rezepturen auf den beiden Bahnen der Mixomat II-Anlage wäre an und für sich möglich, erschien allerdings aufgrund der Gefahr der Verwechslung aus Qualitätssicherungsgründen nicht angebracht.

Nach statischer Systemüberprüfung wurden die Kriterien für den stahlfaserbewehrten Spritzbeton festgelegt zu:

- Druckfestigkeit nach 28 Tagen: 38 MPa
- Durchschnittlicher Wert für die Erstrisszugfestigkeit nach 7 Tagen: 3,4 MPa
- Durchschnittlicher Wert für die Erstrisszugfestigkeit nach 28 Tagen: 4,2 MPa
- Nachrisszugfestigkeit (Residual strength factor)  $R_{30/10}$  nach 28 Tagen: 70
- Zähigkeitsindizes (Toughness indices) nach 28 Tagen:  $I_{10} > 8$ ;  $I_{30} > 22$

Es war somit der Nachweis zu führen, dass mit der eigentlich für die Aussenschale gewählten Rezeptur auch diese Kriterien eingehalten werden konnten. Speziell hinsichtlich der Nachrisszugfestigkeit, die im wesentlichen das Verhältnis zwischen Zugfestigkeit und Nachrisszugfestigkeit wiedergibt, war die hohe Frühfestigkeit (der praktische Verlauf der Festigkeitsentwicklung lag noch über der IIII-Grenze) nicht sehr dienlich.

Die Resultate der durchgeführten Tests, sowie deren Übernahme in die 3D-Statik bestätigten aber schließlich die Tauglichkeit der Rezeptur auch für diesen - ursprünglich nicht vorgesehenen - Zweck. Der Auftraggeber stimmte schließlich aufgrund der gegenüber dem Amtsentwurf signifikanten Kosteneinsparung der Ausführung des VECP zu.

### 6.3 Ausführung der Spritzbetonarbeiten Innenschale

Tunnelsohle und Mittelwand wurden wie vorgesehen in Ortbetonbauweise hergestellt.

Der Einbau der Folienabdichtung und des darunterliegenden Geotextils wurde von einem amerikanischen Subunternehmer, der Fa. Wisko aus Kensington, MD ausgeführt. Bild 13 zeigt die mit aussenliegenden Fugenbändern ausgeführte Schotteinteilung.

Als besonderer Problembereich wurde das satte Einspritzen der aussenliegenden Fugenbänder ge-

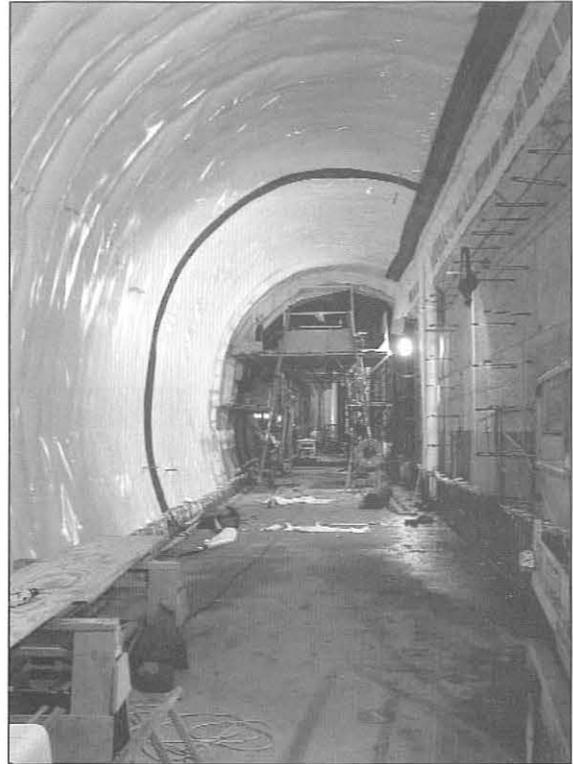


Bild 13: Schotteinteilung mittels aussenliegender Fugenbänder

sehen. Um dies zu gewährleisten wurde ein eigener Arbeitsgang eingeführt, bei dem mit der für die Spritzbeton-Deckschicht vorgesehenen kleinen Spritz-Ausrüstung und mit Spritzbeton-Sackware die Fugenbänder und die parallel dazu eingelegten, mehrfach verpreßbaren Injektionsschläuche, gezielt vorab eingespritzt wurden.



Bild 14: Spritztest Einspritzen Fugenbänder

Gegenüber dem Ursprungsprojekt "Innenschale aus Schalbeton" war die standardmäßige Firstspaltinjektion durch eine Verpressung von Zementsuspension in den möglicherweise bestehenden "Hohlraum" zwischen Abdichtungsfolie und Stahlfaser-

spritzbeton der Innenschale ersetzt worden. In der Praxis zeigten sich tatsächlich erhebliche Verpressmengen, die darauf schließen lassen, dass das gewünschte enge Anliegen der Folie an den Spritzbeton der Außenschale auch nach Abschluss der Spritzarbeiten der Innenschale nicht immer vollflächig der Fall ist. Es gab auch - trotz der oben geschilderten Vorgangsweise - immer noch einzelne Umläufigkeiten der Zementsuspension über die aussenliegenden Schottfugenbänder hinweg. Das Einlegen von Injektionsschläuchen entlang der Schottfugenbänder war daher absolut notwendig.

Danach konnten die Einzelschotts bei Vorkommen von Wasserzutritten mittels einzubauender PVC-Stand- und Injektionsrohre separat mit Kunstharz verpreßt werden. Entlang der kritischen Längsfugen zwischen Gewölbe und Mittelwand einerseits und Gewölbe und Sohlfuge andererseits wurden ebenfalls mehrfach verpreßbare Injektionsschläuche entsprechend Herstellerangabe eingebaut.

Die Herstellung des gespritzten Gewölbes konnte fugenlos erfolgen.

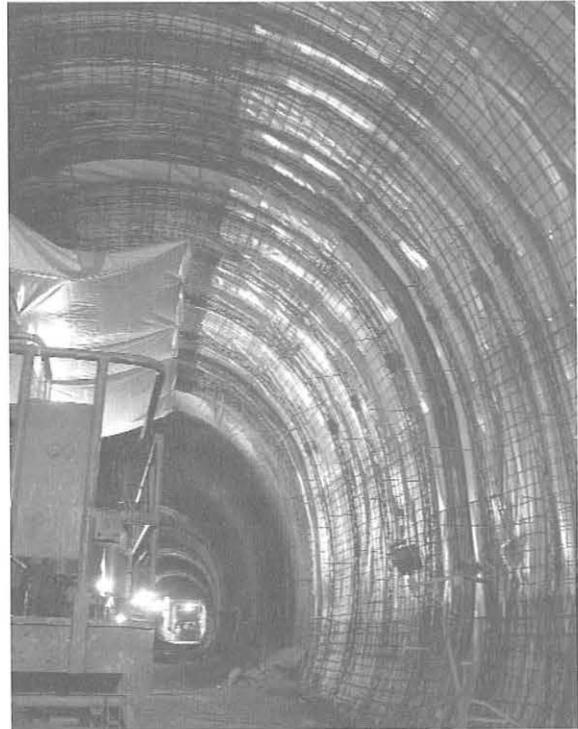
Während der Herstellung mussten Einzellagen des Spritzbetons vor Auftrag der nächsten Lage selbstverständlich sauber gereinigt und vor Spritzbeginn bewässert werden.

#### 6.4 Profilsicherung

Zur Ermöglichung des "Aufbaus" des Spritzbetons bzw. des Überkopfauftrages des SFRS (SFRS = Steel Fiber Reinforced Shotcrete = Stahlfaserspritzbeton) auf PE-Folie wurde ein Stahlgitter mit Maschenweite 15 cm eingezogen, das mit leichten Gitterbögen im Abstand von 1,50 m positioniert wurde (*Bild 15*). Mittels Kunststoff-Abstandhaltern wurde das Gitter zur naturgemäß leicht durchhängenden Folie auf Distanz gehalten.

Nachdem ein Ausgleichen von Unebenheiten mit der 5 cm-Deckschicht später praktisch kaum mehr möglich ist, musste bereits die Oberfläche des SFRS die Ebenflächigkeitskriterien erfüllen:

Über "Igeleisen", die an die Gitterbögen angeschweißt und nach Einmessung lagegenau abgeschnitten wurden, konnte eine umlaufende Spritzlehre hergestellt werden. In der Praxis zeigte sich, dass es für den Düsenführer dann wirklich sehr einfach war den richtigen Zeitpunkt zum Einstellen des Spritzvorganges zu finden, wenn die Solllage mittels einer zu befestigenden, sehr leichten, Bewehrungsmatte ("Hasengitter") fixiert war. Im Augenblick des 'Verschwindens' der Matte unter der eben gespritz-



*Bild 15: Vorbereiten Spritzuntergrund Innenschale*

ten Schicht war das Ende des Spritzvorganges an der jeweiligen Stelle erreicht. Die Herstellung der ausreichenden Betonüberdeckung dieser "Lehre" wurde dann mit der 5 cm starken Deckschicht besorgt.

#### 6.5 Deckschicht

Für deren Herstellung war eine spezielle Ausstattung der Baustelle notwendig. Beim Material fiel die Wahl auf ein Fertig-Trockenprodukt aus Kanada mit Größtkorn 4 mm und einer Beimischung von 1,5 kg/m<sup>3</sup> Polypropylenfasern mit einer Fasereinzellänge von 6 mm. Die Anforderungen hinsichtlich Druckfestigkeit waren dieselben wie beim SFRS der Innenschale und konnten eingehalten werden. Das Produkt wurde in 20 kg Säcken geliefert. Gespritzt wurde mit einer kleinen, druckluftbetriebenen Aliva 246 Spritzmaschine, die im Tunnel nahe der Einbaustelle positioniert war und händisch befüllt wurde.

Vor dem Auftrag der Deckschicht musste die Oberfläche des SFRS mittels Hochdruckwasserstrahl gereinigt und das Korngerüst freigelegt bzw. von Staubablagerungen und Zementschlümpe befreit werden. Der dazu notwendige Wasserdruck von über 1.000 bar bei gleichzeitiger relativ hoher Fördermenge an Wasser konnte mit einem dieselbetriebenen Hochdruck-Dampfstrahler erzielt werden (*Bild 17*).



Bild 16: Auftrag der 5 cm starken Deckschicht



Bild 18: Fertiggestellter Tunnel



Bild 17: Hochdruck-Dampfstrahler zur Vorbereitung des Untergrundes für die 50 mm Deckschicht

Die Haftzugfestigkeit zwischen SFRS und der Deckschicht war in den Vertragskriterien auf 1,0 MPa festgelegt worden, was bei entsprechender Reinigung der Trennlage vor Aufbringen der Deckschicht ohne Probleme erreichbar war. Aus Praktikabilitätsgründen wurde dieser Versuch nicht im Tunnel sondern an - im Tunnel vor Ort gespritzten - Probekisten durchgeführt.

## 7. Resumé

Mit enger und konstruktiver Zusammenarbeit aller Beteiligten - Ausführende Firma/ Bauherr/ Designer - war es möglich eine schwierige Baustelle technisch erfolgreich abzuschließen und ein zufrieden stellendes Produkt zu übergeben. Die betreffende U-Bahn Strecke ging im Dezember 2004 in Betrieb. Die erstmalige Anwendung der NATM in Neuengland war nicht zuletzt aufgrund der im Zuge der Ausführung nachträglich ins Projekt eingebrachten Innovationen ein technischer Erfolg, was sich auch darin widerspiegelt, dass die Massachusetts Bay Transportation Authority die Fortführung der U-Bahnlinie Silverline (Projektname Silverline III) neuerlich als NATM-Projekt zur Ausschreibung bringen wird.

## 8. Literatur

- [1] Urschitz, G.; Neumann, C.; Del Grosso, S.: NATM Tunneling Through Frozen Ground at Russia Wharf - The Designer's and Contractor's View. NAT 2004, Atlanta, GA.