

---

# UMSETZUNG INNOVATIVER NÖT-KONZEPTE BEIM PLYMOUTH TUNNEL IN MARYLAND, USA

---

## ***TUNNEL CONSTRUCTION USING INNOVATIVE NATM-CONCEPTS AT THE PLYMOUTH TUNNEL IN MARYLAND, USA***

Norbert **Fügenschuh**, BeMo Tunnelling GmbH, Innsbruck/ Österreich  
Jean-Marc **Wehrli**, Traylor Brothers Inc., Evansville, Indiana/ USA

Der 310 m lange und mittels NÖT/ NATM errichtete Plymouth Tunnel in Silver Spring, Maryland ist Teil der Purple Line, einer neuen, circa 16,2 Meilen langen, Light Rail Strecke von Bethesda nach New Carrollton an der Nordost-Peripherie von Washington D.C.. Bereits im Zuge der Vortriebsarbeiten wurden im Hinblick auf den Spritzbeton europäische Konzepte und Ideen umgesetzt. Das Design-Build Projekt ermöglichte in weiterer Folge dem Unternehmer die Herstellung der Tunnelinnenschale in Spritzbetonbauweise auf PVC-Kunststoffdichtungsbahn. Es wurde versucht ein einfaches, aber dennoch effektives Konzept zu planen und umzusetzen und damit der komplizierten Arbeitsmarktsituation im Nordosten der USA Rechnung zu tragen.

Dem Projekt Plymouth Tunnel wurde seitens der American Shotcrete Association ASA der „Outstanding Underground Project of the Year Award 2019“ verliehen.

*The 310 m long NATM Plymouth Tunnel in Silver Spring, Maryland is part of the new 16.2 mile long Light Rail (Purple Line) connection, which runs from Bethesda to New Carrollton along the Northeast periphery of Washington D.C.. European shotcrete concepts were applied already during the excavation works. The Design-Build project allowed the contractor to install a tunnel inner lining consisting of shotcrete, sprayed against a PVC waterproofing membrane. The intention was to develop a simple, but effective design taking into account the challenging labor situation in the Northeast of the US.*

*The American Shotcrete Association ASA awarded the Plymouth Tunnel the “Outstanding Underground Project of the Year 2019” award.*

### **1. Einleitung**

Die Purple Line umfasst den Neubau einer 26,1 km langen Light Rail Strecke (in Österreich würde man es Straßenbahn nennen) mit insgesamt 21 neuen Stationen. Der Streckenverlauf, der sich zu 100% auf dem Staatsgebiet von Maryland befindet, kreuzt an vier Stellen die speichenförmig angelegten Strecken der Washingtoner Metro. Die Purple Line schafft somit eine ausgezeichnete Anbindung der bevölkerungsreichen Randgemeinden an das U-Bahn Netz von Washington D.C.. (Bild 1)

Der Großteil der Trassenführung ist auf Straßenniveau, lediglich eine Anbindung an die Redline in Bethesda und das kurze Stück des Plymouth Tunnels in Silver Spring werden unterirdisch erstellt.

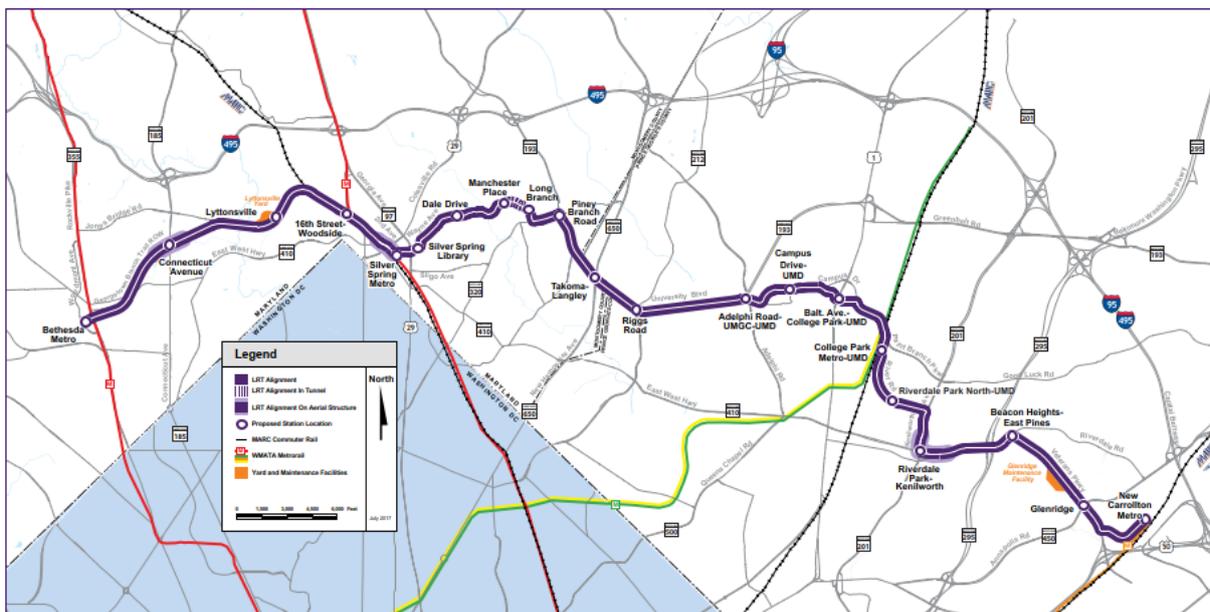
Das Projekt wird als sogenanntes P3-Projekt, als Private Public Partnership und als Design Build Projekt errichtet. Der Auftrag wurde im Jahr 2016 von Maryland Transportation Authority MTA an das Konzessionärskonsortium Purple Line Transit Partners (PLTP), bestehend aus

den Firmen Fluor – Star America und Meridiam vergeben. Dieses Konsortium finanziert das Projekt und betreibt die Linie über einen Zeitraum von 30 Jahren ab Inbetriebnahme der Strecke.

Der eigentliche Bauauftrag wurde zwischen PLTP und Purple Line Transit Constructors (PLTC), einer Arbeitsgemeinschaft bestehend aus den Firmen Fluor, Lane (Salini-Impregilo-Healy) und Traylor Brothers geschlossen. Die Auftragssumme für die schlüsselfertige Errichtung der Linie beläuft sich auf ca 2,1 Milliarden USD. Die Eröffnung der neuen Purple Line ist in zwei Phasen geplant für 2022 bzw 2023, kann sich aber aufgrund aktueller, nicht vom Tunnelbau herrührender Verzögerungen noch um einige Monate verschieben.

Beide untertägigen Abschnitte werden von Traylor Brothers gebaut. BeMo Tunnelling, bzw deren US-Tochterfirma Beton- und Monierbau USA Inc. wurde bereits sehr frühzeitig eingebunden und mit einem Design-Review, Constructability Review, Hilfe bei der Gerätewahl, Geometriestudien und anderen tunnelrelevanten Vorbereitungsleistungen beauftragt.

Zusätzlich erhielt BeMo im Frühjahr 2018 den Auftrag, während der Vortriebsarbeiten (von Mai 2018 bis Februar 2019) des Plymouth Tunnels mit zwei Polieren/ Gerätefahrern (operating Superintendents) vertreten zu sein und Traylor Brothers baubegleitend zu unterstützen. Im Zeitraum der Herstellung der Spritzbetoninnenschale von Juni 2019 bis November 2019 reduzierte sich die baubetriebliche Begleitung durch BeMo Tunnelling auf einen mitarbeitenden Polier, der auch praktisch die gesamten Spritzarbeiten durchführte.



*Bild 1: Trassenführung Purple Line in Maryland*

(aus <https://www.purplelinemd.com/about-the-project/project-maps>)

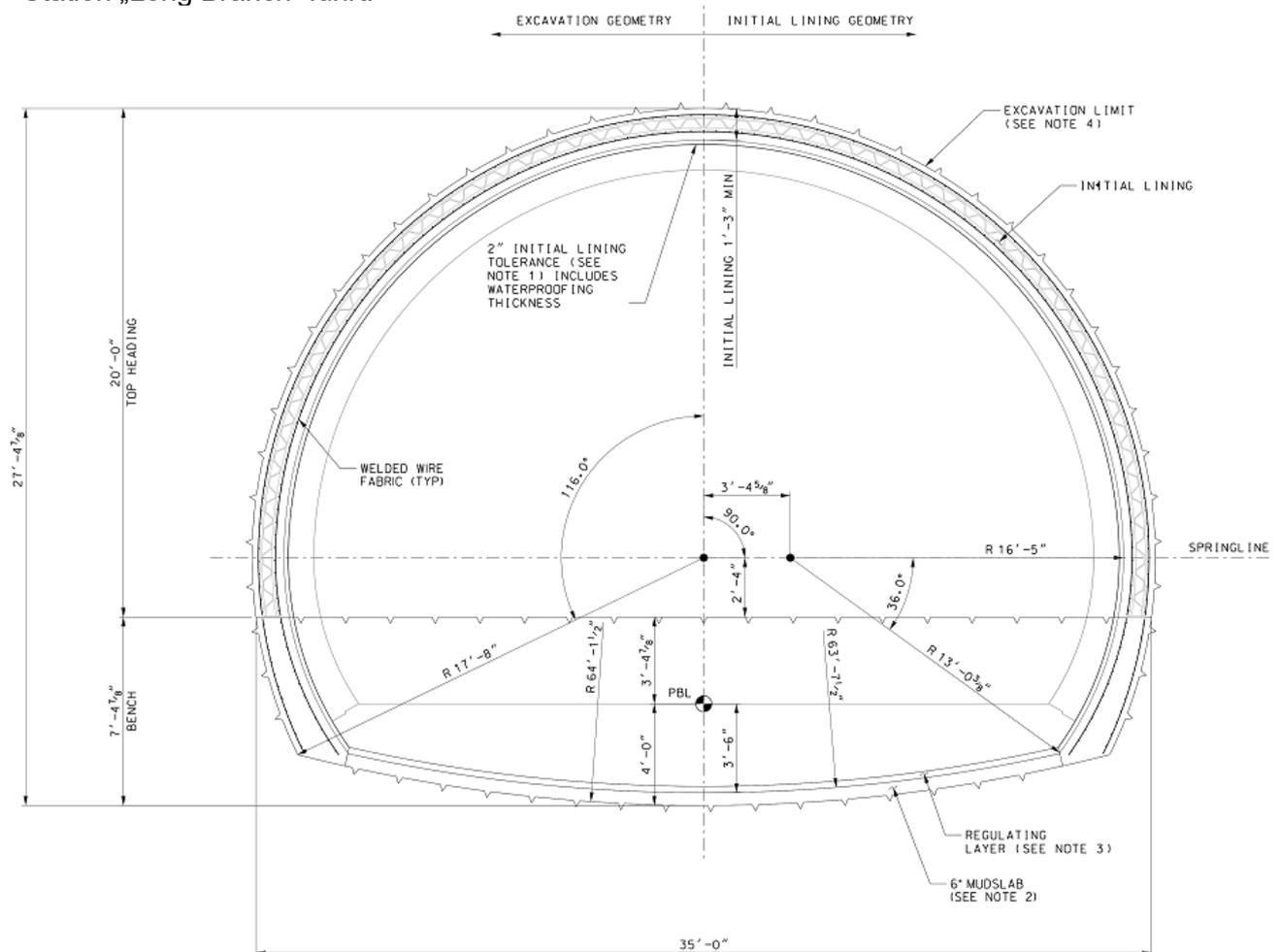
Der blau hinterlegte Bereich zeigt das Stadtgebiet von Washington D.C.

Eine Grundidee dieses Arrangements war es auch durch aktive Mitarbeit lokales Personal zu trainieren und mit den komplexen Vortriebsgeräten vertraut zu machen. Dieses Konzept hatte sich auch auf anderen nordamerikanischen Baustellen bereits sehr bewährt.

Silver Spring ist ein Vorort von Washington D.C. mit etwa 85.000 Einwohnern. Die Stadt ist bereits mit der Red Line an das U-Bahnnetz angebunden und zeichnet sich durch eine enorme ethnische Vielfalt aus, ist aber auch ein wichtiges wirtschaftliches Zentrum.

## 2. Das Projekt

Der Plymouth Tunnel ist etwa 310 m lang und wird als zweigleisiger Tunnel nach den Prinzipien der NÖT/NATM errichtet. Der Tunnel führt vom Kreuzungsbereich Flower Avenue/ Arliss Street im Osten bis zur Einmündung in die Wayne Avenue im Westen. Die neue Station „Manchester Place“ liegt unmittelbar an das Westportal des Tunnels anschließend. An das Ostportal schließt eine etwa 60 m lange offene Bauweise (Cut & Cover) an, die dann in eine etwa 90 m lange Rampe (Sohle, vertikale Wände) zur neuen, auf Straßenniveau liegenden Station „Long Branch“ führt.



*Bild 2: Regelprofil Plymouth Tunnel (Maßangaben im amerikanischen Maßsystem)  
Anmerkung: die Sohl drainage unterhalb der Außenschale in der Tunnelsohle ist nicht dargestellt*

Bild 2 zeigt die Ausbruch- bzw. Außenschalengeometrie. Auf die Darstellung der bauzeitlichen Sohl drainage wurde verzichtet. Das Drainagesystem bestand aus einem mittig in einem Graben unterhalb der Tunnelsohle in Drainagekies verlegten, längslaufenden Kunststoffrohr DN 200 (8 inch) in Kombination mit bauseits im Abstand von etwa 65 m (200 feet) angeordneten Schächten.

### 3. Vortriebsarbeiten

#### 3.1 Geologie

Die Geologie während der Auffahrung zeigte sich in der Kalotte wechselhaft, vorwiegend bestehend aus verwitterten Felszonen, teilweise mit eingebetteten Sandhorizonten, die in ihrer gesamten Ausprägung eher an Boden erinnerten. Der Grundwasserhorizont folgte im Prinzip der Geländeoberfläche und lag auf 60 – 70% der Tunnelstrecke oberhalb der Tunnelfirste. Auch in den Strecken mit verwittertem Fels resultierten die Wasserzuflüsse in keinen wesentlichen Problemen für den Tunnelvortrieb. Die Stehzeiten, auch der verwitterten Zonen, waren ausreichend und konnten mit den für solche Baugrundverhältnisse üblichen Methoden, d.h. Spießen und Stützkern, ausreichend beherrscht werden. Die Abschlagslänge während des gesamten Vortriebs war 1,20 m (4 feet).

Der sogenannte Bedrock, d.h. der unverwitterte Felshorizont mit Festigkeiten von teilweise deutlich über 140 MPa, ondulierte in etwa um das Niveau der Kalottensohle und umfasste auf einigen Teilen der Tunnelstrecke auch größere Teile der Kalottenbrüst. Mit Lockerungssprengungen konnten aber auch diese Strecken ohne größere Probleme aufgeföhren werden.

In der Strosse/ Sohle des Tunnels war der Großteil der Tunnelstrecke im Fels.

#### 3.2 Gerätekonzept Vortrieb

Die Beschreibung der Geologie im Geotechnical Baseline Report GBR [1] führte zum Gerätekonzept eines Baggervortriebs mit fallweiser Notwendigkeit von Lockerungssprengungen:

- 1 Bohrwagen Atlas Copco E2C
- 1 Bagger Liebherr 950 T
- 2 Fahrlader Atlas Copco Typ ST-14
- 2 Spritzroboter Meyco Potenza
- 2 Transportmischer Fiori DB 560 Ts
- 1 Baustellenmischanlage Wiggert (ACT WiCoMix WM 1500)

Das Lösen des mitunter sehr kompakten Felsens in der Strosse erfolgte teilweise mittels einer schweren Planierdraupe CAT D6 mit Reißzahn (Herstellung eines Mittelschlitzes), kombiniert mit Lockerungssprengungen. Auf Teilstrecken musste auch gesprengt werden, wobei die Baustelle ein Konzept mit vertikal von der Kalottensohle aus gebohrten Sprenglöchern wählte und so längere Abschnitte der Strosse (bis zu 20 m) auf einmal absprengte. Das dazu verwendete Bohrgerät war ein Atlas Copco T20 Bohrgerät auf Reifen.

Traylor Brothers hatte sich entschieden den Vortrieb mit einem durchgehenden Kalottenvortrieb auszuführen. Dieser wurde dann, nach dem Kalottendurchschlag, gefolgt vom Strossenvortrieb. Ein echtes Sohlgewölbe war im Design nicht vorgesehen. Es wurde lediglich eine 15 cm starke Sauberkeitsschicht eingezogen.

Die Platzverhältnisse am Ostportal präsentierten sich großzügig und erlaubten, dass die gesamte Baustelleneinrichtung, einschließlich der baustelleneigenen Mischanlage, dort installiert werden konnte.

Dementsprechend wurden auch die gesamten Vortriebsarbeiten von Osten nach Westen durchgeführt. Vom Baugrubenverbau der Offenen Bauweise am Ostportal (überschnittene Bohrpfehlwand, Durchmesser 1.000 mm) wurde ein 15 m langer Rohrschirm, bestehend aus 45 Rohren mit Durchmesser 139,8 mm, eingebaut. Nach 10 m Vortrieb mit sukzessiver Aufweitung folgte auf dieser Seite ein weiterer Rohrschirm gleicher Ausprägung. Der im

Design vorgesehene Rohrschirm am gegenüberliegenden Westportal konnte als Reaktion auf die während der Vortriebsarbeiten angetroffene, ausreichend gute Geologie entfallen. Er wurde durch einen verstärkt ausgebildeten – und in die Bohrpfahlwand einbindenden – Spießschirm, gebohrt vom Vortrieb aus, ersetzt.

Das Ausbruch-Regelprofil des Tunnels war 10,67 m breit und 8,35 m hoch. Mit Ausnahme eines kurzen Aufweitungsbereiches blieb der Ausbruchquerschnitt unverändert. Das Tunnelprofil auf den letzten etwa 60 m war gegenüber dem Regelprofil etwas vergrößert. Die Abschlagslänge war durchgehend 1,20 m und Spieße wurden als Regelstützmaßnahme während des gesamten Tunnelvortriebs bei jedem Gitterbogen eingebaut. Die 30 cm starke Außenschale wurde zweilagig mit Matten bewehrt. Fallweise kamen Ortsbrustanker und/ oder ein Stützkern zur Anwendung.

Die Kalotte wurde, dem Gerätekonzept geschuldet, mit etwa 6 m Höhe gewählt und gestattete so den Einsatz des kraftvollen Liebherr 950 Tunnelbaggers. Die Strosse war daher nur mehr niedrig, ein Sohlgewölbe hat das Design nicht vorgesehen.

Die Vortriebsarbeiten wurden, wie in USA üblich, im Wochenbetrieb Montag früh bis Samstag früh mit 3 Schichten à 8 Stunden durchgeführt. Führungspersonal arbeitete schichtübergreifend in 12 Stunden Schichten von 6 bis 18 Uhr bzw. 18 bis 6 Uhr.

### 3.3 Bebauung / Überdeckung

Der Streckenverlauf des Tunnels unterquert in Ost-West-Richtung gesehen mit geringer Überdeckung die Flower Avenue und verläuft dann unterhalb der Plymouth Street bis zum Westportal, kurz vor der Einmündung in die Wayne Avenue. Die Überdeckung liegt im Tunnelverlauf zwischen 4,5 m und 12 m. Beidseits der Plymouth Street befindet sich Wohnbebauung in Form von Einfamilienhäusern. Im Bereich des Westportals wurden mehrere kleinere Gebäude entfernt, um die Baugrube für die zukünftige Station und die Anschlagwand des Tunnels herstellen zu können. Das Portal liegt hier komplex eingebettet zwischen zwei 8-stöckigen Wohnblocks. (Bild 3) Auch hier bestand der Baugrubenverbau an der Tunnelanschlagswand aus einer überschnittenen Bohrpfahlwand, im Voreinschnitt aus einer Trägerbohlwand. Die letzten Abschlüge wurden im Schutze eines vom Vortrieb aus in die Bohrpfahlwand eingebohrten Spießschirms aufgefahren. Der Durchbruch durch die Bohrpfahlwand erfolgte dann von außen von der Baugrube aus.



*Bild 3: Bebauungssituation am Westportal (Wayne Avenue im Vordergrund) –*

*Situation März 2019***3.4 Spritzbeton während der Vortriebsphase**

Mit der baustelleneigenen Mischanlage wurde versucht, die Flexibilität der Baustelle zu erhöhen. Die Alternative den Nass-Spritzbeton extern zu beschaffen und anzuliefern hätte speziell während der Nachtstunden und an Wochenenden Abhängigkeiten geschaffen, die den normalen Bauablauf schwierig gestalten hätten. Unabwägbarkeiten, wie die Verkehrssituation während der Rush-hour Phasen [2], verstärken das Problem.

Auch den hohen Kosten des Spritzbetons bei Bestellung/ Anlieferung während der Nacht lässt sich mit Eigenproduktion viel leichter begegnen. Dieses Konzept, in Europa relativ weit verbreitet, hat sich auf Tunnelbaustellen in USA noch nicht umfassend durchgesetzt.

Nach Evaluierung wurde seitens der Baustelle eine Mischanlage der Firma Wiggert, Typ ACT WiCoMix 1500 ausgestattet mit 1,0 m<sup>3</sup> Zwangsmischer, gewählt und in Eigenregie betrieben (Bild 4).



*Bild 4: Baustellenmischanlage Plymouth Tunnel (Montagezustand)*

Weitere Daten zur Anlage und deren Ausstattung:

- Zwangsmischer mit Feuchtigkeitsmess-Sonde
- Leistung: ca. 30 m<sup>3</sup>/h
- Gewichtsdosierung über Wiegezellen für Zuschlagstoffe, Zement, Microsilica und Wasser
- Silos für Zement Typ I/II (110 m<sup>3</sup>) und pulverförmiges Microsilika (30 m<sup>3</sup>)
- Überdachte Lagerboxen für Kies und Sand, je ca. 100 Tonnen
- Boileranlage zum Heizen des Anmachwassers im Winter
- Kühlanlage (chiller) für Kühlung des Anmachwassers im Sommer
- Einhausung
- Dosiersystem für Superplastifizierer und Verzögerer
- fallweise wurde zusätzlich zur Kühlanlage versucht die Zuschlagstoffe in der Lagerbox mittels Sprinkleranlage zu kühlen.

Bei großer Hitze reichte das Kühlen des Anmachwassers nicht aus; an einigen Tagen war es notwendig, extern zugekauft Eis zuzugeben.

Anfängliche Probleme mit unzuverlässiger Wasserdosierung waren dadurch verursacht, dass der Feuchtigkeitssensor an der Sandlagerbox installiert worden war. Die Messergebnisse gaben die tatsächliche Feuchteverteilung innerhalb des Sandlagers nicht wirklichkeitsgetreu wieder. Nach Umsetzen des Feuchtigkeitssensors in den Mischer der Anlage war die Wasserzugabe unter Kontrolle und hat im weiteren Baustellenverlauf bestens funktioniert.

In Zusammenarbeit mit einem Labor (Dr. Zhang) aus Vancouver, Canada wurde eine Spritzbetonrezeptur entwickelt und erfolgreich eignungsgeprüft:

453 kg/m <sup>3</sup>	Zement, Typ I/II von Lafarge Holcim
1.213 kg/m <sup>3</sup>	Sand, Aggregate Industries aus Accokeek, MD
395 kg/m <sup>3</sup>	Kies, GK11, Aggregate Industries, Millville quarry, MD
39 kg/m <sup>3</sup>	Microsilika (8 %), Sika
196 Liter/m <sup>3</sup>	Wasser
1,5 kg/m <sup>3</sup>	Mapei 1092 (Wasserreduzierungsmitel)
1,0 kg/m <sup>3</sup>	Mapei Renu (Verzögerer)

w/z Wert: < 0,42

Gespritzt wurde im Nass-Spritzverfahren mit Spritzroboter Meyco Potenza und Beschleunigerzugabe an der Spritzdüse.

Das Ziel war es, den in den Projektspezifikationen vorgegebenen Erhärtungsverlauf entsprechend einer „modifizierten J2 Kurve“ zu erzielen

Nach 1 Stunde:	0,5 MPa
Nach 3 Stunden:	1,0 MPa
Nach 6 Stunden:	2,0 MPa
Nach 12 Stunden:	4,8 MPa (2,8)
Nach 24 Stunden:	10,3 MPa (5,0)
Nach 7 Tagen:	17,5 MPa
Nach 28 Tagen:	34,5 MPa

In Eignungstests wurde der alkalifreie Beschleuniger Mapei AF70 als am besten geeignet befunden. Eine Dosierung zwischen 6 und 7 % vom Zementgewicht wurde als Standard gewählt.

Die Spezifikationen forderten das Erreichen dieser Festigkeitswerte für die Außen- und auch für die gespritzte Innenschale. Die Modifikation gegenüber der „normalen“ J2-Kurve ist in der Form, dass die zu erreichenden Festigkeiten ab 12 Stunden deutlich höher sind. Bis 6 Stunden sind die Werte der beiden Kurven gleich. Die oben in Klammer eingesetzten Werte bei 12 und 24 Stunden sind die Werte der J2-Kurve aus der österr. Spritzbetonrichtlinie.

Die Baustelle wollte für beide Bauteile dieselbe Spritzbetonrezeptur verwenden. Ein Ziel, das mit der beschriebenen Rezeptur auch erreicht wurde.

Die Baustelle entschied sich in der Ausführung der Außenschale mit zweilagiger Mattenbewehrung zu arbeiten. Diese Entscheidung ist entgegen dem Trend am US-Markt, wo die allermeisten Baustellen mit Stahlfaserbewehrung arbeiten. Die Argumente sind vielfältig, reduzieren sich aber in erster Linie auf eine Kostenbetrachtung.

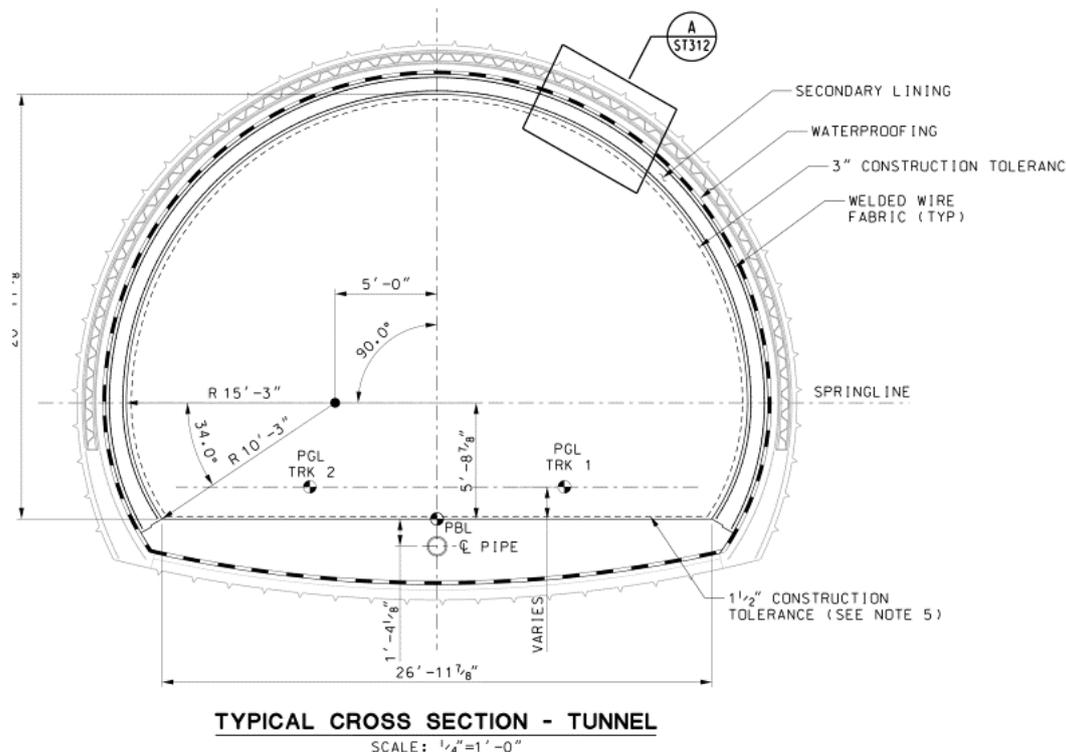
Das Argument der zusätzlichen Arbeitsschritte, die durch das Installieren der Bewehrung notwendig werden, wurde kalkulatv abgewogen. Die zusätzlichen Lohnkosten werden aufgewogen durch folgende Fakten:

- der teure Stahlfaserspritzbeton landet auch im unvermeidlichen Überprofil,
- der Rückprall enthält einen überproportional hohen Anteil an Stahlfasern,
- die Spritzbetontestphase ist deutlich billiger (das Qualitätsthema reduziert sich im Wesentlichen auf das Erreichen der Druckfestigkeit, was im Allgemeinen kein Problem darstellt),
- die Oberflächenqualität der Spritzbetonaußenschale ist sehr hoch,
- der Spritzbetonabdichtungsträger kann dadurch ganz oder teilweise entfallen,
- der Buy-America Act, geltend für alle Stahlprodukte, limitiert die Anzahl möglicher Lieferanten für Stahlfasern in extremem Umfang.

Die erreichte Oberflächenqualität der Außenschale war ausgezeichnet. Das planmäßige Überspritzen der inneren Bewehrungslage mit etwa 5 cm resultierte in einer sehr geringen Welligkeit ohne die oft zu sehende Girlandenbildung zwischen den Ausbaubögen.

Auch die Rauigkeit der Spritzbetonschale war so, dass der nachfolgende Subunternehmer für die Abdichtungsarbeiten (Renesco aus Chantilly, Virginia) die Oberfläche ohne Zusatzmaßnahmen akzeptierte - der Abdichtungsträger konnte somit ersatzlos entfallen bzw. reduzierte sich auf einzelne wenige Stellen, die auszubessern und zu glätten waren.

Die Verwendung von Stahlfaserspritzbeton in der Außenschale hätte aufgrund der vorstehenden Fasern vor Anbringen der PVC-Folienabdichtung in jedem Fall den vollflächigen Auftrag eines Spritzbetonabdichtungsträgers notwendig gemacht.



*Bild 5: Tunnelquerschnitt – Abdichtungssystem und Innenschale (Maßangaben im amerikanischen Maßsystem), Anmerkung: die Sohl drainage unterhalb der Außenschale in der Tunnelsohle ist nicht dargestellt*



*Bild 6: Einbau der Sauberkeitsschicht in der Tunnelsohle*

Im Zuge des Strossenvortriebs erfolgte sukzessive auch der Einbau einer Sauberkeitsschicht in der Sohle. (Bild 6) Über die Arbeitswoche gesehen wurde Montag bis Donnerstag jeweils die Strosse vorgetrieben, am Freitag wurde dann die Strecke der Wochenleistung mit der Sauberkeitsschicht versehen. (Bild 7)



*Bild 7: Sauberkeitsschicht Tunnelsohle*

## 4. Innenschale

### 4.1 Tunnelabdichtung

Das Design verlangte eine druckwasserdichte Rundumabdichtung und ließ lediglich temporär während der Vortriebsphase eine Drainagierung des Grundwassers mit Grundwasserabsenkung zu. (Bild 5) Die in der Sohle im Zuge des Strossenvortriebs eingebaute Sauberkeitsschicht diente nach Reinigung als Verlegeoberfläche für das Geotextilvlies und die darauf verlegte KDB.

In den Ulmen und im Gewölbe wurde mit Hinblick auf die später zu spritzende Innenschale darauf geachtet, das Abdichtungssystem möglichst glatt an den Spritzbeton der Außenschale zu montieren. Mittels eines verdichteten Rasters der Befestigungsrondellen wurde die Anzahl der Befestigungspunkte gegenüber „normaler“ Montage deutlich erhöht und dadurch das Durchhängen der KDB soweit reduziert, dass der Spritzbetonauftrag ohne große Probleme möglich war. (Bild 8)

Eine Verdichtung der Befestigungspunkte auf ein 60 cm Raster erbrachte das gewünschte Resultat.

Außenliegende, 6-stegige Fugenbänder waren radial umlaufend an den Blockfugen und longitudinal an den Fugen zwischen Sohle und Gewölbe und zusätzlich auch in 10 und 14 Uhr Position auf die KDB aufgeschweißt.

Entlang den längslaufenden Fugenbändern und zusätzlich auch noch in der Firste wurden Injektionsschläuche eingebaut und nach Einbau der Spritzbetoninnenschale verpresst. Ein Verpressen von Injektionsgut erfolgte nur zwischen Spritzbeton und Abdichtung, nicht hinter der KDB.



*Bild 8: Sohlbeton und PVC-Kunststoffdichtungsbahn im Tunnelgewölbe*

#### 4.2 Sohlbeton

Der Sohlbeton wurde designkonform in insgesamt 17 Blöcken mit einer Einzellänge von 18,30 m mittels konventioneller Schalung hergestellt (zwei der 17 Blöcke hatten eine geringfügig längere Blocklänge). (Bild 8)

#### 4.3 Gewölbebeton

Das Design sah die Herstellung der 30 cm starken Innenschale mittels Stahlschalung vor, eröffnete dem ausführenden Bauunternehmer aber alternativ die Möglichkeit die Innenschale mittels Spritzbeton zu planen und herzustellen.

Kostengegenüberstellungen aller eingehenden Faktoren – unter anderem wurde auch die Möglichkeit des Ankaufs einer gebrauchten Schalung mit entsprechender Adaptierung in die Überlegungen einbezogen – kamen zum Schluss, dass der Ausführung der Innenschale in Spritzbetonbauweise der Vorzug gegenüber Ausführung in Ortbeton gegeben werden sollte. Ausschlaggebend dafür war sicherlich auch die relative kurze Tunnellänge, in Kombination mit mehreren Querschnittsveränderungen, die Adaptierungen der Gewölbeschalung erfordern hätten.

Ein weiterer Faktor in den Konzeptüberlegungen war, dass das Baustellenpersonal über den Verlauf der Vortriebsphase bereits mit den Abläufen im Zusammenhang mit Spritzbetonanwendung vertraut war. Der in Europa nach Abschluss der Vortriebsarbeiten übliche Austausch der Vortriebsmannschaft gegen eine Betontruppe ist in USA aus gewerkschaftlichen Gründen nicht einfach möglich. Komplexe Betonierarbeiten in einem Tunnel mit Leuten durchzuführen, die Monate vorher im Vortrieb gearbeitet haben, führt oft zu großen Problemen.

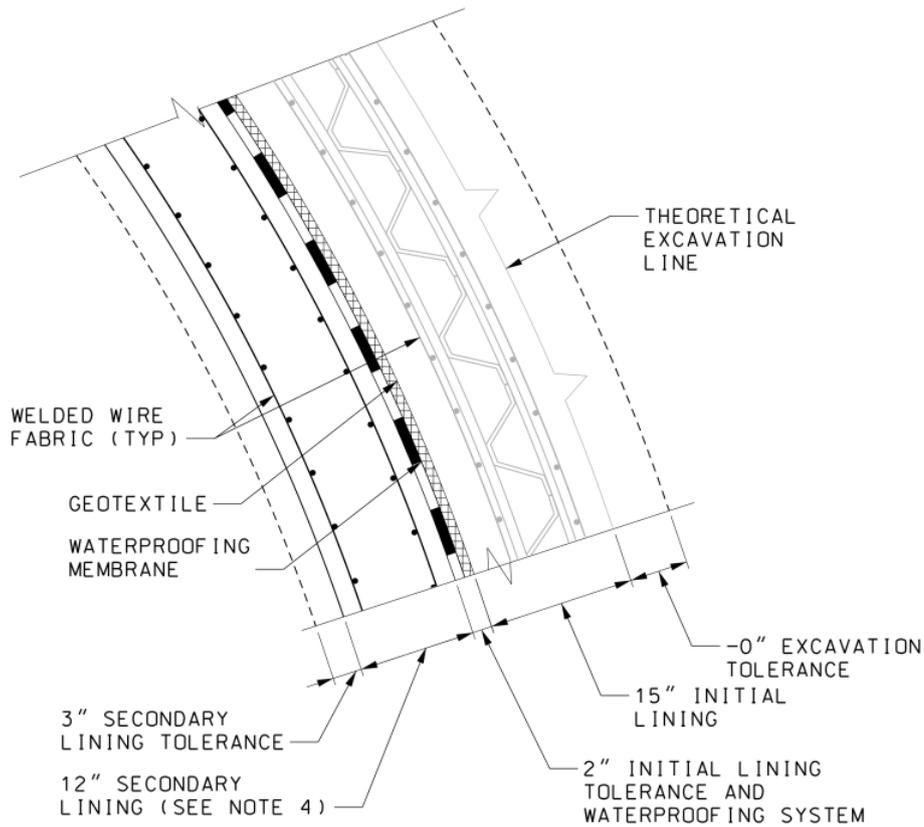
Um den Beton-Prüfaufwand zu minimieren war es eine Vorgabe der Baustelle, dass man mit derselben Spritzbetonsorte arbeiten wollte, die auch im Zuge des Tunnelvortriebs für die Außenschale verwendet wurde.

Mittels einer Probefläche, gespritzt auf KDB im Bereich des Rohrschirmsägezahns am Ostportal, konnte der Bauherr davon überzeugt werden, dass das System den vertraglichen Qualitätsvorgaben entsprach. Aus der Probefläche wurden auch mehrere Bohrkerne gezogen.

Der Auftraggeber verlangte hinsichtlich Oberflächenqualität lediglich auf den unteren 1,80 m, beidseits oberhalb des Gehwegs eine Spritzbetonoberfläche mit reduziertem Grobkorn, um Abschürfungsverletzungen beim Vorbeigehen zu vermeiden.

#### 4.4 Ausführung Innenschale

Dem Grundprinzip eines einfachen Designs folgend, wollte die Baustelle auch bei der Innenschale mit Mattenbewehrung arbeiten. Auf die Möglichkeit diese Bewehrung auf BA-Anker, die die Abdichtungsfolie penetrieren, aufzuhängen, wurde verzichtet. Anstelle dessen wurde ein Konzept mit Tragbögen in Form von Gitterbögen gewählt. Diese wurden höhen- und lagemäßig exakt positioniert, im Abstand von 1,50 m. Die statische Höhe, d.h. der Abstand der beiden Bewehrungslagen, wurde durch die Bogenhöhe gewährleistet. Daraus resultierte ein starkes Gitterbogenprofil vom Typ CP 130/6/10 mit einer Bauhöhe (Außenmaß) von ca. 18 cm. (Bild 9)



*Bild 9: Planische Darstellung Außen- und Innenschale mit dazwischenliegender PVC-KDB  
(Maße im amerikanischen Maßsystem)*



*Bild 10: Spritzen der Innenschale auf PVC-KDB*

Als Aufbauhilfe für den direkt gegen die KDB gespritzten Spritzbeton kam fallweise, d.h. in Bereichen wo der Abstand der bergseitigen Bewehrungslage zur Abdichtungsfolie zu groß

(> 10 cm) war, eine zusätzliche dünne Mattenlage („Hasengitter“) zum Einsatz, die direkt gegen die Folie verlegt und gegen den Gitterbogen bzw. die bergseitige Mattenlage verspreizt wurde. Dazu wurden nach einigem Testen Plastikschienen eingesetzt, die in verschiedenen Höhen erhältlich sind und normalerweise als Abstandhalter verwendet werden. Die Abfolge des Spritzbetoneinbaus wurde vorher überlegt und im Zuge der Ausführung optimiert. Der Spritzbetonauftrag erfolgte in 3 Lagen, wobei aus qualitativen Gründen nie durch mehr als eine Mattenlage gespritzt wurde. (Bild 10) Vor jedem Auftrag einer Spritzbetonlage wurde die Oberfläche genau und mit hohem Wasserdruck von Staubablagerungen und losem Material gereinigt, um Lagenbildung in der Schale zu verhindern.

Die lage- und höhenmäßig exakte Positionierung des Gittertragbogens stellte auch sicher, dass die innere Bewehrungslage richtig positioniert war. Dies wiederum gab dem Düsenführer eine sehr schöne Indikation wo der Spritzvorgang der zweiten Lage zu beenden ist.

Nach dem Auftrag der zweiten Lage (Einspritzen der luftseitigen Bewehrungsmatte) musste das Profil kontrolliert werden, um bei Einbau der finalen Lage sicherzustellen, dass nicht überspritzt wird. Dazu wurden Plastikpins eingebohrt, lagegerecht eingemessen und entsprechend eingekürzt. Daran konnte sich der Düsenführer dann beim finalen Spritzvorgang orientieren.

Sämtliche Lagen der Tunnelinnenschale wurden, so gut als möglich, durch Feuchthalten nachbehandelt. Die Nachtschicht war angehalten die Benässung sicherzustellen.

#### 4.5 Feinmaterial-Deckschicht beidseits oberhalb des Gehwegs

Es wurde beschlossen diesen Bereich beim Spritzen der Innenschale mit der regulären Rezeptur auszusparen und als letzten Schritt mit einer werksgemischten, ofentrockenen Spritzbetonmischung zu spritzen. Das Material (MS-W1, Hersteller King Packaged Materials, Ontario) wurde in Bigbags mit je 1.000 kg angeliefert, in den Fiori-Transportmischern mit Wasser angemischt und dann als Nass-Spritzbeton verspritzt. Das geeignete Wasser-Trockenware-Verhältnis wurde zuvor in Tests ermittelt und dann über die gesamte Bauzeit beibehalten. Das eigentliche Spritzen der nur 5 cm starken Deckschicht beidseits auf den unteren 3,0 m Höhe (der Gehweg wurde erst danach betoniert) wurde wie alle anderen Spritzvorgänge mit den Meyco Potenza Spritzrobotern durchgeführt, die dazu natürlich auf das untere Ende der Spritzleistungsskala einzustellen waren. Der erfahrene BeMo-Düsenführer schaffte es aber auch hier, eine hervorragende Oberflächenqualität zu erzielen.

Die Nachbehandlung der Deckschicht erfolgte durch Benässen und Aufhängen von PE Folie um Austrocknen zu verhindern. Es wurde auch das Tunnelportal zugehängt um Zugluft zu vermeiden.

Auf eine exakte Trennlinie zwischen grober Spritzbetonrezeptur im Gewölbebereich und Feinspritzbeton im Gehwegbereich wurde bewusst verzichtet. Der sich dadurch ergebende wellenartige Verlauf dieses Übergangs stellt sich für das menschliche Auge als angenehm dar und wirkt nicht störend. (Bild 11)



*Bild 11: Spritzbetoninnenschale nach Abschluss der Arbeiten*

## 5. Zusammenfassung

Der Plymouth Tunnel ist eines der wenigen in USA umgesetzten Bauprojekte bei dem auch die Innenschale in Spritzbeton hergestellt wurde. Das Projekt zeichnet sich aber nicht nur dadurch aus. Es wurde insgesamt versucht den „üblichen“ amerikanischen Schwierigkeiten zu begegnen:

- Die mangelnde NATM-Erfahrung des lokalen Personals wurde durch Ergänzung der Mannschaften mit österreichischen Allround-Spezialisten ausgeglichen.
- Während der Vortriebsphase Erlerntes (Spritzbetonapplikation) wurde auch während der Innenschalenherstellung angewendet und umgesetzt.
- Die bauseitige Planung des Design-Build Projekts nahm auf diese kaum lösbaren systembedingten Schwachpunkte in der Form Rücksicht, dass konservativ, aber dennoch innovativ geplant wurde.
- Frühzeitiges Einbinden von NATM-Spezialisten, bereits bei Geräteauswahl, Spritzbetonkonzept und Baustelleneinrichtung ermöglichte die Umsetzung eines Bauablaufs wie er auch in Mitteleuropa nicht viel anders gewesen wäre.

Die Kombination aus robustem Design, gutem Gerätekonzept und einem guten Führungsteam machte den Plymouth Tunnel zu einem großen Erfolg für alle Beteiligten.

## 6. Literatur

- [1] MTA Maryland: Plymouth Tunnel, Geotechnical Baseline Report for bidding, GBR-A, Revision 02, January 12, 2015.
- [2] Urban Mobility Report 2019, Texas A&M Transportation Institute
- [3] Tabor, N.; Fügenschuh, N.: Maryland Purple Line – Plymouth Tunnel. In: Shotcrete Magazine, Volume 22, Number 1 Winter 2020, Seite 38 – 41.
- [4] Fügenschuh, N.: Spritzbetonanwendung unter schwierigen Verhältnissen beim Projekt „Russia Wharf Tunnel“ in Boston, USA. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Tagungsband Spritzbeton-Technologie 2006, Alpbach, Eigenverlag 2006.

## Zu den Autoren

Dipl.-Ing. Norbert Fügenschuh

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens Bauwesen an der TU Graz 1982 – 1989, seit 1.2.1990 bei BeMo Tunnelling, Bau- und Projektleiter auf diversen Tunnelbauprojekten in Deutschland, USA, Canada und Schweden. Seit 2011 Area Manager für Aktivitäten in USA und Canada mit Sitz in Vienna, Virginia.  
[norbert.fuegenschuh@bemo.net](mailto:norbert.fuegenschuh@bemo.net)

Dipl.-Ing. Jean-Marc Wehrli

Studium des Bauingenieurwesens an der ETH Zürich 1991 – 1996, seit Dezember 2005 bei Traylor Brothers mit Sitz in Evansville, Indiana. Projektingenieur und Projektleiter auf diversen Tunnelbaustellen in Singapur und USA, u.a. in San Diego, New York und Maryland.  
[jwehrli@traylor.com](mailto:jwehrli@traylor.com)