BIM bei der Bestandssicherung im innerstädtischen Tunnelbau – Ein Beispiel

Dipl.-Ing. Univ. Paul Pandrea
Keller Holding GmbH, Offenbach, Germany

1 Der Verkehrsknotenpunkt Victoria Station

Der U-Bahnhof Victoria ist Teil des Verkehrsknotens Victoria Station, der noch aus einem überirdischen Kopfbahnhof und einem Busbahnhof besteht. Hier kreuzen sich die im älteren und hochgelegenen Teil des U-Bahnhofs geführten District und Circle Lines, eröffnet 1868, mit der im tief gelegenen Teil geführten Victoria Line, eröffnet 1969 und damit mehr als 100 Jahre später. Mit ca. 85 Millionen Passagieren pro Jahr (ohne umsteigende Fahrgäste) ist es nach Waterloo, Oxford Circus und King's Cross St. Pancras der am stärksten frequentierte Bahnhof im gesamten Londoner U-Bahn-Netz. Da die Passagierzahlen seit langem deutlich oberhalb der Kapazitätsgrenze liegen, müssen die Bahnsteige zu Stoßzeiten immer wieder wegen Überfüllung geschlossen werden. Eine Erweiterung wird daher schon seit den 1990iger Jahren diskutiert.

Nach intensiven Voruntersuchungen, Machbarkeits- und Variantenstudien einschließlich eines Großversuchs zur grundsätzlichen Eignung des Düsenstrahlverfahrens als Sicherungsmaßnahme für den Tunnelvortrieb wurde mit der London Underground (Victoria Station Upgrade) Order 2009 Nr. 2364 des Secretary of State (Innenminister) der formelle Beschluss zur Erweiterung gefasst und zum 18. September 2009 in Kraft gesetzt.

Da ein solcher Verkehrsknoten nicht für mehrere Jahre Bauzeit stillgelegt werden kann, musste die Erweiterung im laufenden Betrieb bei durchgehender Aufrechterhaltung einer ausreichenden Kapazität des Verkehrsknotens erfolgen. Dies galt selbstverständlich auch für die Düsenstrahlarbeiten, die von der Oberfläche ausgeführt werden mussten.

2 Projektübersicht

Das aktuelle Projekt dient der Erweiterung der Fahrgastkapazität des U-Bahnhofs, insbesondere im Hinblick auf die zahlreichen Umsteigevorgänge. Es besteht aus mehreren neuen unterirdischen Bauteilen (Bild 1):

- Nördliche Schalterhalle (Northern Ticket Hall)
- Erweiterung der südlichen Schalterhalle (Southern Ticket Hall)
- Mehrere Rolltreppenanlagen

- Verbindungstunnel zwischen der nördlichen und südlichen Schalterhalle
- Neue Aufzüge für barrierefreien Zugang zu den Bahnsteigen
- Verbesserte Verbindung zwischen dem Bahnhof und dem U-Bahnhof

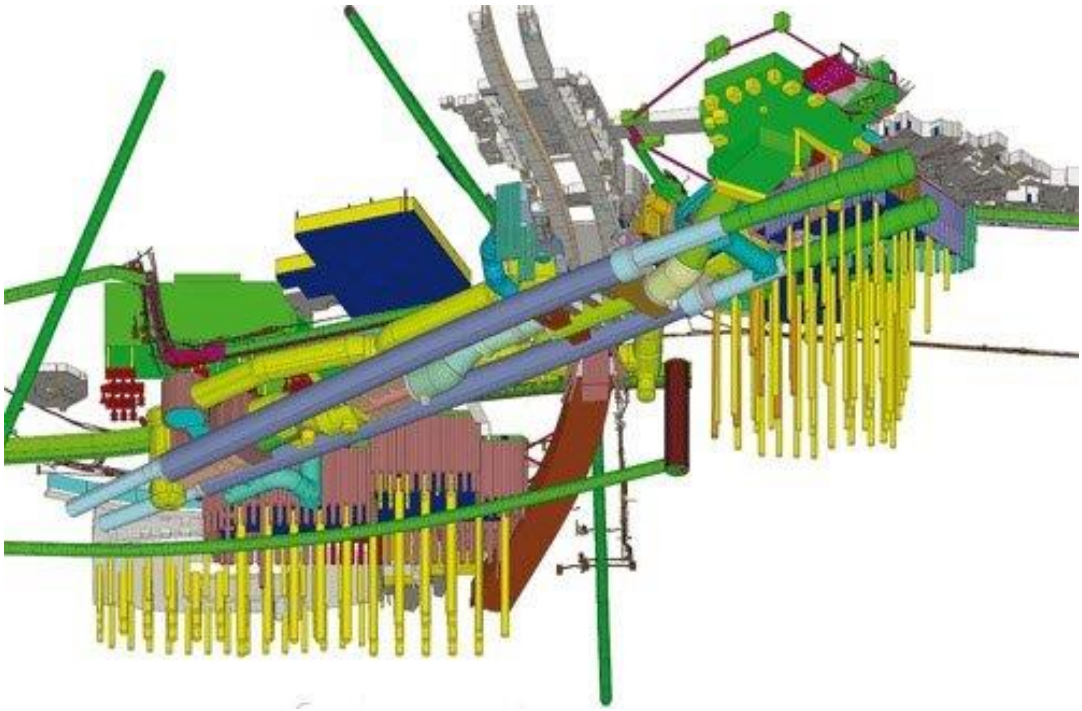

Bild 1: Darstellung der Erweiterungsmaßnahmen

3 Baugrundverhältnisse und Sicherungskonzept

Die Höhenlage der neuen Tunnel, Schächte und Hallen ergab sich aus den Anschlusspunkten an die bestehenden Bauteile und konnte nicht mit Rücksicht auf die vorhandene Geologie optimiert werden. Historische wurde ein Großteil der unterirdischen Infrastruktur in London im undurchlässigen überkonsolidierten London Clay errichtet, in dem auch große Querschnitte ohne nennenswerte Schwierigkeiten bei der Wasserhaltung aufgefahren werden konnten (Attwell & Farmer, 1974). Bei diesem Projekt verlaufen die Gradienten größtenteils entlang der Schichtgrenze zwischen den quartären Kiesen und Sanden (Terraced Gravels) und dem tertiären Ton (London Clay). Die quartären Schichten sind stark wasserdurchlässig während der tertiäre Ton als Stauer fungiert. Bild 2 zeigt den Baugrundaufbau.

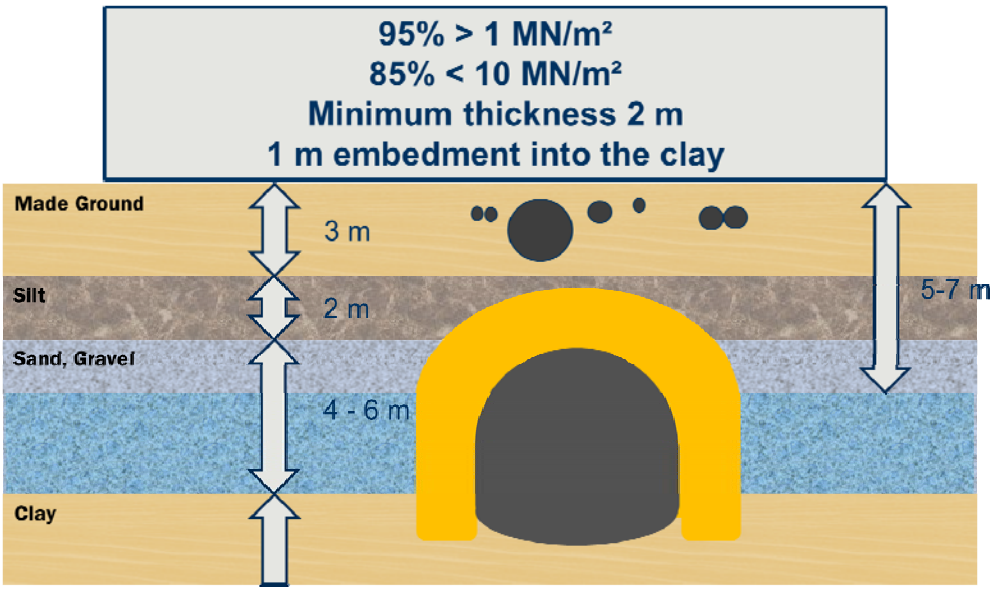

Bild 2: Baugrundaufbau und Höhenlage des Tunnels sowie des Grundwasserspiegels

Als Tunnelvortriebsmethode kam wegen der verwinkelten Geometrie nur ein Spritzbeton-Vortrieb in Frage, wobei die geringe Überdeckung und die Bodeneigenschaften ein konventionelles Grundwassermanagement, z.B. mit Druckluft, nicht zuließen. Es musste ein abdichtendes und gleichzeitig statische wirksames Element zwischen Tunnel und wasserführender Schicht zur Sicherung des Tunnelgewölbes hergestellt werden. Als sicherste und wirtschaftlichste Lösung dafür wurde im Planungsprozess das Düsenstrahlverfahren identifiziert. Das Konzept sah vor, ein Düsenstrahlgewölbe über dem aufzufahrenden Querschnitt in den quartären Schichten herzustellen, das wasserdicht in den London Clay einbindet.

Die Spezifikationen für den Düsenstrahlkörper waren:

- Mindestdicke des Dichtkörpers ab Außenkante des Tunnels 2 m
- Technische Wasserdichtigkeit
- Einaxiale Druckfestigkeit - 95% aller Proben > 1 N/mm² und 85% aller Proben <10 N/mm²
- Durchlässigkeit - 100% aller Tests < 1 x 10-7 m/s und 90% aller Tests < 5 x 10-8 m/s.
- 1 m Einbindung in den London Clay

4 Randbedingungen

Wesentliche Randbedingung für die Ausführung der Sicherungsarbeiten war, wie bereits oben erwähnt, in allen Bauphasen die Leistungsfähigkeit des Verkehrsknotens aufrechtzuerhalten. Das schloss große, zusammenhängende Baufelder aus und erzwang das Arbeiten in temporären Bauinseln, verteilt über das Baufeld. Entsprechend

beengte Arbeitsverhältnisse waren die Folge. Um ausreichend Platz für die Baustelleneinrichtung zu gewinnen, musste diese mehrstöckig ausgeführt werden (Bild 3).

Bild 3: Düsenstrahl-Gerätschaften unter mehrstöckiger Baustelleneinrichtung mit horizontalen Zement-Silos

Eine Besonderheit dieses Projektes war, dass trotz der zahlreichen herzustellenden Bohrungen auf kleinstem Raum, die vielen im Baufeld vorhandenen Leitungen und Einbauten nicht umgelegt werden durften, sondern diese sämtlich in Lage und Funktion zu erhalten waren (Bild 4). Dadurch konnte keine gleichmäßige Säulenausteilung vorgenommen werden, sondern jede Säule musste einzeln 3D in das Gefüge eingepasst werden. Diese Ausführungsplanung konnte für rund 2.200 Düsenstrahlsäulen nur mit Hilfe von BIM als Planungswerkzeug bewerkstelligt werden.

Bild 4: Bestandsleitungen im Baufeld

5 Ausführung

Da der überwiegende Teil der herzustellenden Kubatur in den quartären grobkörnigen Schichten lag, kam das Duplex-Verfahren (D-Verfahren) zur Anwendung. Im Mittel betrug die Bohrlänge 11,9 m und die Düsstrecke 7,3 m. Wegen der vorhandenen Leitungen, deren Zustand altersbedingt größtenteils als kritisch angesehen wurde, erfolgte zunächst für jede einzelne Säule ein kleinräumiger Voraushub zur Erkundung und Verifizierung der tatsächlichen Lage und anschließend der Einbau einer Kunststoffverrohrung mit 350 mm bis unterhalb der Leitungssohle in maximal 4 m Tiefe. Diese Verrohrung diente sowohl als Markierung des Ansatzpunktes als auch zum Auffangen der Bohrspülung und Rücklaufsuspension, um ein Einzementierung der Bestandsleitungen sicher auszuschließen. Bild 5 zeigt die beengten Platzverhältnisse zwischen den vorhandenen Leitungen.

Bild 5: Kunststoffverrohrung an den Bohransatzpunkten der Düsenstrahlsäulen

Auf Grund der kleinen zur Verfügung stehenden Flächen (Inseln) und auch um den Auf- und Abbau darin möglichst schnell bewerkstelligen zu können, wurden jeweils nur die Bohrgeräte und Nebenaggregate zum Auffangen und Abpumpen der Rücklaufsuspension aufgestellt. Mischanlagen und Hochdruckpumpen wurden stationär in der zentralen mehrstöckigen Baustelleinrichtung untergebracht und die Andienung der Bohrgeräte über Leitungsbrücken bewerkstelligt.

Trotz der schwierigen Randbedingungen konnten die spezifizierten Zielgrößen gut erreicht werden. Die größte Durchlässigkeit (Einzelwert) wurde mit 5 x 10^{-8} m/s in einem Laborversuch festgestellt. Ein Feldversuch mit fallendem Wasserspiegel ergab

4 x 10^{-8} m/s. Die Mehrzahl aller Versuchsergebnisse lag unter 1 x 10^{-8} m/s und damit 5-10 mal besser als die Spezifikationen (Bild 6). Die gute Übereinstimmung zwischen Labor- und Feldversuchen ist ein weiterer Nachweis der hohen Ausführungsqualität.

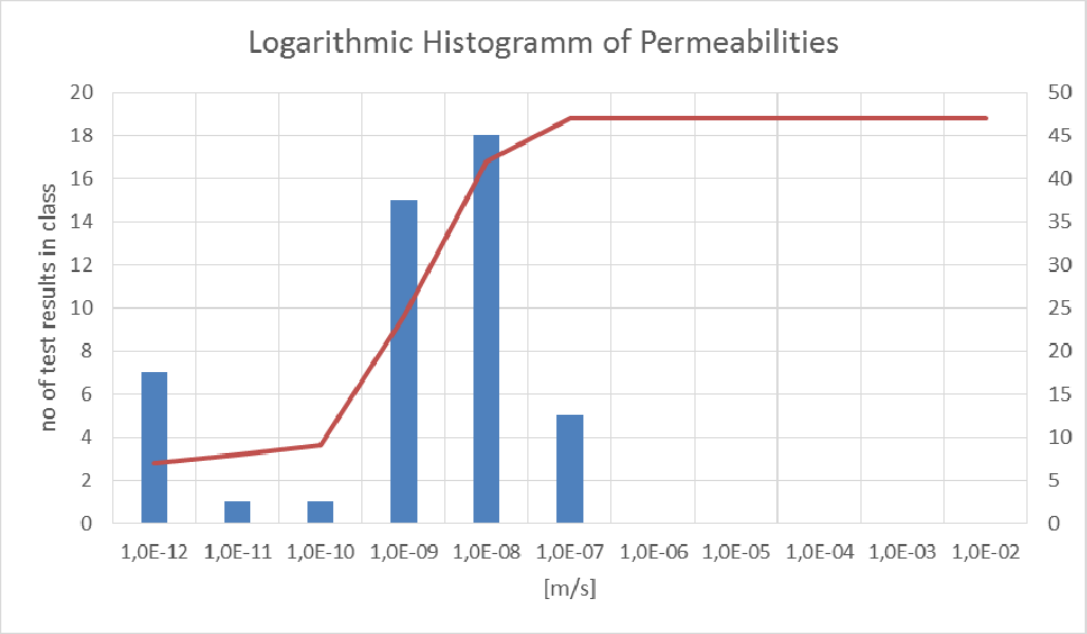

Bild 6: Testergebnisse Durchlässigkeit (max. 5.3 x 10-8 m/s, durchschnittlich 4.6 x 10-9 m/s)

Wegen der unmittelbaren Nähe zum fließenden Verkehr und zu Fußgängern wurde größter Wert auf einen effektiven Spritzschutz während der Düsarbeiten gelegt, der nicht nur am Bauzaun, sondern auch am Gerät installiert wurde.

Zu Beginn der Ausführung wurde mit einem w/z-Wert von 1,0 gearbeitet, der zu Festigkeiten am oberen Ende des definierten Bereiches führte. Daher wurde der w/z-Wert auf 1,1 erhöht, um zu große Festigkeiten zu vermeiden, die den Tunnelvortrieb behindert hätten (Bild 7).

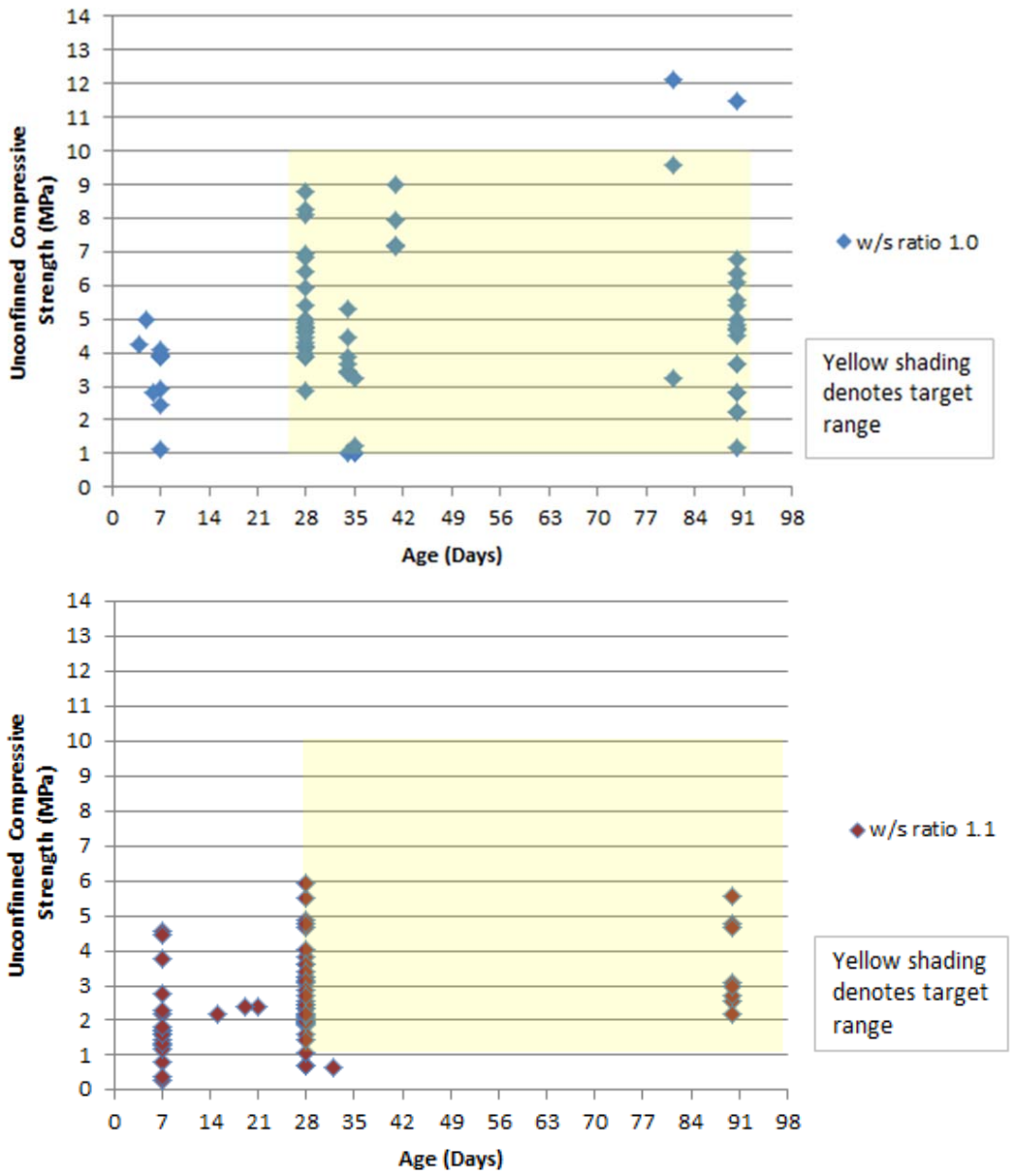

Bild 7: Festigkeit nach w/z-Wert und Probenalter

6 Qualitätssicherung & BIM

Wegen der hohen Anforderungen und des hohen Risikos im Falle von Undichtigkeiten im Düsenstrahlkörper wurden die Arbeiten durch ein striktes Qualitätssicherungs-Regime begleitet. Die Basis dafür bildete das vollständige und integrierte BIM-Modell. In diesem Datenmodell wurde zum einen der komplette Bestand an Bauwerken, Bauteilen und Leitungen in großer Detailtiefe erfasst als auch eine Projektion des Bau-Solls in einer Auflösung bis zur einzelnen Säule durchgeführt. In diesem Modell wurde dann während der Herstellung die tatsächlich hergestellte Geometrie abgebildet (Bild 8).

Dies erlaubte sowohl während der Planung als auch während der Ausführung die Vermeidung von unbehandelten Bereichen mit Verbindung nach außerhalb des Tunnel-

querschnitts. Unbehandelte Bereiche innerhalb des Tunnelquerschnitts wurden dagegen als unkritisch eingestuft.

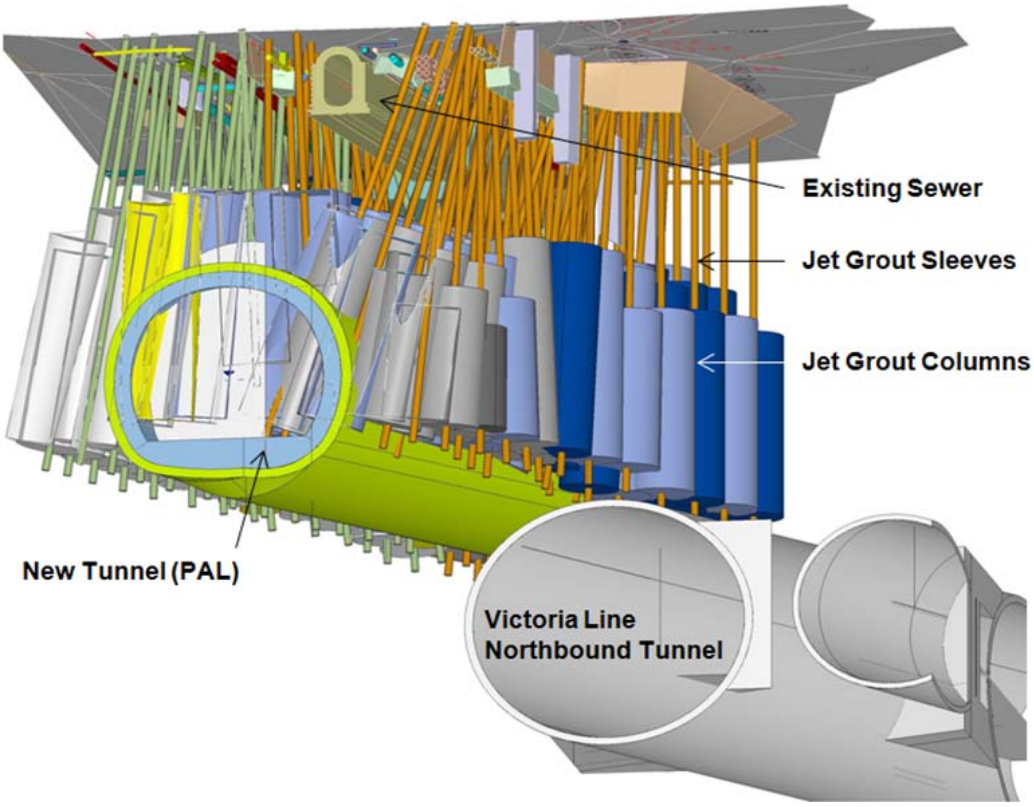

Bild 8: BIM-Modell mit Bestand und Ist-Lage aller hergestellten Düsenstrahlsäulen

Die geometrischen Daten der Düsenstrahlsäulen im BIM-Modell beruhten auf einem Messprogramm bestehend aus zahlreichen Einzelmessungen:

- Geodätischer Einmessung des Bohransatzpunktes und des Bohrvektors aller Säulen
- Messung des Bohrlochverlaufs aller Säulen mit einem Ketteninklinometer
- Lückenlose elektronische Aufzeichnung aller Bohr- und Düsparameter
- Stichprobenartige Durchmesserbestimmung durch Pegelstangen, mit der thermischen Durchmessermessmethode sowie Kern- und Tastbohrungen
- Stichprobenartige Messung der Viskosität der Suspension mit dem Marsh-Trichter
- Laufende Überwachung und Dokumentation der Suspensions- und Rücklaufwichten

- Laufende Bestimmung der Festigkeiten und des E-Moduls an Bohrkernen und Linerproben, an der Frischsuspension als auch an der Rücklaufsuspension
- Messung der Wasserdurchlässigkeit in-situ im abgebundenen Düsenstrahlkörper

Diese umfangreiche Messung und Aufzeichnung begründete sich daraus, dass das Düsenstrahlverfahren ein „indirektes“ Verfahren ist. Damit ist gemeint, dass gerade kein mechanisches Werkzeug mit bekannter Geometrie durch den Baugrund geführt wird und so eine kontrollierte Elementgeometrie erzwingt, sondern ein Schneidstrahl mit bodenabhängig variabler Reichweite verwendet wird. Die zuverlässige Bestimmung der erzielten Elementgeometrie gelingt bei diesem Verfahren nur durch eine vergleichende und gemeinsame Auswertung verschiedenster voneinander unabhängiger Werte, Daten und Parameter durch den Verfahrensspezialisten mit geeigneten Auswertungstools, wie sie ein BIM-Modell bereitstellt. Auf Basis dieses BIM-Modells wurden für den Tunnelvortrieb als Element des projektspezifischen Risikomanagements Prognosen über zu erwartende Fehlstellen erstellt. Diese unvermeidbaren Fehlstellen wurden erzwungen durch ungünstige geometrische Randbedingungen und stellten sich als nicht zu schließende Zwickel dar. Die hohe Genauigkeit des Modells konnte beim Tunnelvortrieb durchgehend bestätigt werden (Bild 9).

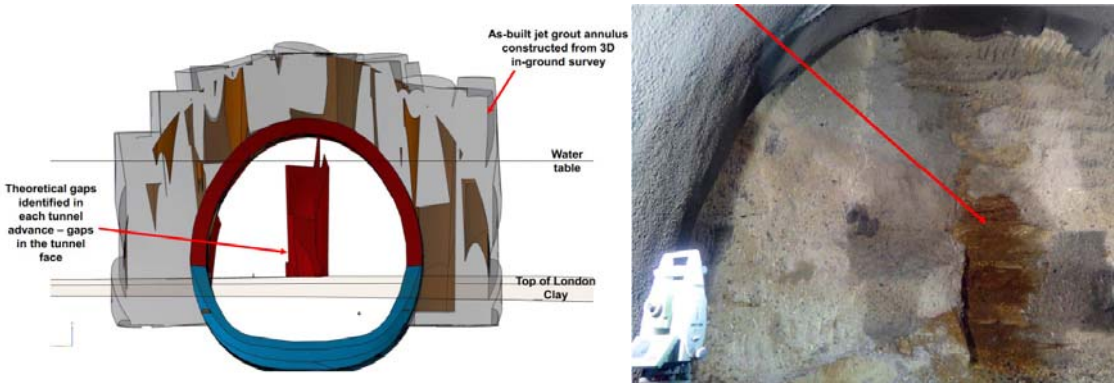

Bild 9: Prognostizierte und tatsächliche Fehlstelle

Das wesentliche Ausführungsrisiko wäre, wie bereits festgestellt, eine Fehlstelle mit Verbindung zum Grundwasser gewesen. Dieses Risiko hat sich im gesamten Projekt nicht materialisiert.

7 Messtechnische Überwachung Bestand

Zusätzlich zu den qualitätstechnischen Messungen mussten baubegleitend bestehende Bauwerke im Einflussbereich der Düsenstrahlarbeiten überwacht werden. Diese Überwachung umfasste die Messung von Erschütterungen und Lärmpegeln sowie die Messung von Setzungen und Verdrehungen (Bild 10). Auch diese Werte wurden in das BIM-

Modell integriert. Während der Ausführung der Düsenstrahlarbeiten und des Tunnelvortriebs wurden keine schädlichen Verformungen an Bauwerken und Grundleitungen festgestellt. Insbesondere wurde zu keiner Zeit eine Hebung festgestellt, eines der Risiken bei unsachgemäßer Ausführung der Düsenstrahlarbeiten.

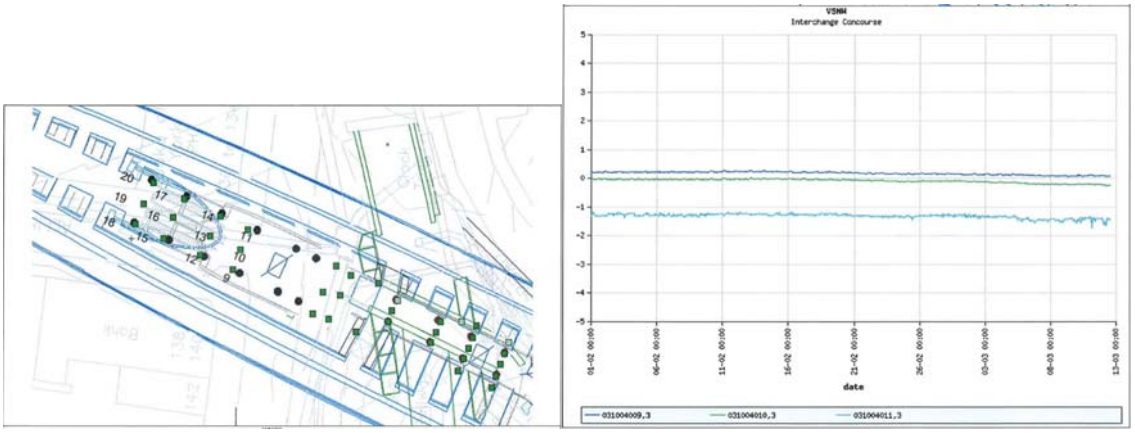

Bild 10: Verformungsmessungen

Die Messungen erfolgten permanent und wurden in Echtzeit ausgewertet. Bei Überschreitung von Alarm- und Grenzwerten wurden automatisiert vordefinierte Alarmketten ausgelöst und die Produktion gestoppt. Dieser Fall trat jedoch während der Bauzeit von 2,5 Jahren nur wenige Mal auf, da man sich bereits in der Planungsphase auf realistische Grenzwerte einigen konnte.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Düsenstrahlverfahren konnte bei diesem Projekt eine anspruchsvolle Sicherungsaufgabe im Tunnelbau unter schwierigsten Randbedingungen gelöst werden. Voraussetzung dafür war neben einer strikten Qualitätskontrolle während der Ausführung eine Planung innerhalb eines integrierten Building Information Model (BIM). Nur ein solches Model ermöglicht überhaupt ein sinnvolles Management der anfallenden Datenmengen für 2.200 Säulen und darauf aufbauend ein qualifiziertes Risikomanagement.

Insbesondere die Festigkeit, die bei diesem Projekt sowohl mit einem unteren als auch einem oberen Grenzwert festgelegt wurde, konnte zuverlässig erreicht werden. Das Hauptrisiko von durchgehenden Fehlstellen konnte beherrscht und vermieden werden. Die wichtigste Nebenanforderungen dieses Projektes, alle Arbeiten ohne eine Umlegung oder Beschädigung der Leitungen und Kabel im Untergrund auszuführen, konnte durch sorgfältige Planung und Ausführung erreicht werden. Voraussetzung auch dafür war der Einsatz eines integrierten BIM-Modells.

Wesentliche Erkenntnisse aus diesem „BIM-Projekt“ sind:

- BIM-Systeme müssen erheblich anwenderfreundlicher werden, um den Aufwand für die manuelle Datenpflege und -auswertung, der noch sehr zeitaufwändig ist, zu reduzieren.
- Die Ausbildung der Ingenieure im Bereich von BIM muss vertieft werden, damit es zu einem anerkannten Industriestandard werden kann.
- Für BIM-Systeme müssen einheitliche Schnittstellen und Formate für den systemübergreifenden Datenaustausch definiert werden.
- Arbeiten in einzelnen isolierten Baufeldern im innerstädtischen Bereich erfordert eine ausgeklügelte Logistik und Planung sowie Flexibilität zur Anpassung an unvorhergesehene Ereignisse.

Bereits während der Bauzeit wurde mit der Planung der nächsten Evolutionsstufe des Verkehrsknotenpunktes begonnen. Im Rahmen von Crossrail 2 (eine Verbindung von Wimbledon im Südwesten durch die City nach Tottenham Hale und New Southgate im Nordosten) ist beabsichtigt, eine neue U-Bahnlinie durch den Bahnhof Victoria Station zu führen. Dies wurde bereits in der Planung des jetzigen Bauabschnittes berücksichtigt.

9 Literatur

Attwell, P. B., Farmer, I. W. (1974)

Ground Deformations Resulting from Shield Tunnelling in London Clay, Canadian Geotechnical Journal, 11(3), Aug. 1974, 380-395

Secretary of State (2009)

London Underground (Victoria Station Upgrade) Order 2009 No. 2364