

Stadtbahn Europaviertel Frankfurt: Tiefe Baugruben und maschineller Vortrieb im „Frankfurter Ton“

In unmittelbarer Nähe zur Frankfurter Innenstadt entsteht unter der Bezeichnung „Europaviertel“ ein neuer Stadtteil, der durch die Stadtbahnstrecke B, Teilabschnitt 3 Europaviertel erschlossen werden soll. Teil dieses Projekts ist die Erstellung der Station Güterplatz in offener Bauweise. Als Baugrubenverbau ist eine verformungsarme Bohrpfahlwand geplant, die durch die Tiefenlage der Baugrubensohle von 24 m und durch die außergewöhnlichen geologischen und hydraulischen Verhältnisse erforderlich wird. Im Bereich der Baugrube verläuft eine Verwerfung mit einem Gesteinswechsel von Sanden und Kiesen zu wasserundurchlässigen Schichten des Frankfurter Tons. Die Sicherung der Baugrube gegen die resultierende hohe Belastung ist durch eine zusätzliche Stützung des Fußauflagers (Sohlsteife) und eine innenliegende Aussteifung geplant. Die Tunnelabschnitte in geschlossener Bauweise sollen in maschineller Bauweise hergestellt werden. Wegen der sehr inhomogenen Baugrundverhältnisse und der sonstigen technischen Randbedingungen wurde durch die Projektbeteiligten beschlossen, die Wahl des Vortriebverfahrens dem Wettbewerb im anstehenden Vergabeverfahren zu überlassen.

1 Generelle Entwicklung des Europaviertels Frankfurt

In unmittelbarer Nähe zur Frankfurter Innenstadt entsteht auf einer Gesamtfläche von ca. 100 ha auf dem Gelände des ehemaligen Hauptgüterbahnhofs (Bild 1) unter der Bezeichnung „Europaviertel“ ein neuer Stadtteil mit Wohn- und Gewerbeimmobilien, Plätzen und Parkanlagen. Die derzeit umgesetzte Entwicklung ist in Bild 2 dargestellt. Durch die Infrastrukturmaßnahme „Stadtbahnstrecke B, Teilabschnitt 3 (TA3) Europaviertel“ soll dieser neue Stadtteil zukünftig auch durch den schienengebundenen Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) erschlossen werden.

2 Das Projekt Stadtbahn Europaviertel Frankfurt

Geplant ist eine zweigleisige Verlängerung der bestehenden Stadtbahnlinie U5. Die Gesamtlänge der neuen Strecke beträgt ca. 2.600 m und beginnt am bereits vorhandenen Verzweigungsbauwerk unterhalb des Platzes der Republik. Die Trasse verläuft im ersten Teilabschnitt unterirdisch, teilweise unterhalb bestehender Bebauung. Der unterirdische Teilabschnitt endet nach 1.160 m am Rampenbauwerk in der Europa-Allee. Er verläuft von Ost nach

Frankfurt Europa District Urban Transport Scheme: Deep Construction Trenches and mechanized Driving in "Frankfurt Clay"

A new city quarter called "Europaviertel" is being created in close proximity Frankfurt's inner city and will be connected to the public transport system via the urban transport line B, section 3 Europaviertel. Part of this project involves the construction of Güterplatz Station in open cut excavation. The shoring system planned for the building pit consists of a low-deformation drilled pile wall, which is necessary because of the depth of the building pit, with its base at 24 m below ground level, and the exceptional geological and hydraulic conditions. The building pit crosses a fault line where sand and gravel strata change to layers of Frankfurt clay, which is water-impermeable. It is intended to secure the building pit against the resulting high imposed loads by additional supports of the base bearing (base struts) and internal bracing elements. The bored tunnel sections are intended to be constructed using mechanised driving technology. Owing to the very inhomogeneous ground conditions and the other technical conditions, those involved in the project decided to leave the choice of tunnel drive technology to the bidders participating in the planned tender process.

West als Tunnelabschnitt mit zwei getrennten Tunnelröhren mit einer Gesamtlänge von rund 840 m, der nach ca. 425 m durch das unterirdische Stationsbauwerk Güterplatz mit rund 170 m Länge unterbrochen wird (Bild 3). Nach ca. 840 m Streckenlänge werden die Gleise zusammen in einem in offener Bauweise erstellten Bauwerk mit konstanter Neigung zur Geländeoberfläche geführt. Das Stationsbauwerk Güterplatz wird in offener Bauweise hergestellt.

3 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Die im Projektgebiet erkundeten Schichten sowie die Tiefenlage der Bauwerke im unterirdischen Streckenabschnitt sind in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Im Projektgebiet stehen unterhalb der oberflächennahen Auffüllungen quartäre Sande und Kiese an. Die Unterkante dieser Schicht (Schicht 3) liegt überwiegend bei etwa 6 bis 8 m Tiefe unterhalb der Geländeoberfläche. Die

Stadtbahn Europaviertel Frankfurt



Bild 1 Ehemaliger Güterbahnhof Frankfurt (2004)



Bild 2 Entwicklung Europaviertel Frankfurt (2011)

darunterliegenden tertiären Schichten sind östlich der Station Güterplatz sowie im östlichen und mittleren Stationsbereich durch den Frankfurter Ton (Schicht 5) geprägt. Im westlichen Teil der Stationsbaugrube fällt der Frankfurter Ton um etwa 15 m steil ab. Ab hier wird der Baugrund im Bereich der tertiären Schichten durch einen inhomogenen Verlauf der Schichtgrenze zwischen dem liegenden Frankfurter Ton (Schicht 5) und den darüber anstehenden Sandschichten des Pliozäns (Schicht 4) geprägt, wodurch insbesondere Querschnitte der Tunnelröhren westlich der Station Güterplatz in inhomogenen Baugrundverhältnissen aufgeföhren werden müssen.

Bei den pliozänen Schichten handelt es sich um wechselnde schluffige, teils kiesige Sande mit mitteldichter bis dichter Lagerung, in die Schluffe und Tone eingeschaltet sind. Der Frankfurter Ton (Miozän) stellt einen Schichtenkomplex dar, der überwie-



Bild 3 Lageplan unterirdischer Streckenabschnitt – Verlängerung U5

gend von Tonmergeln sowie vereinzelt von reinen Tonen geprägt ist. Die Tonschichten sind erfahrungsgemäß ausgeprägt plastisch (TA). In diesen Böden sind unregelmäßig und nicht horizontalbeständig Sande (Hydrobiensande) sowie Kalkstein- und Dolomitsteinbänke eingeschaltet. Die Dicke der im Projektgebiet erkundeten Kalksteinbänke wurde überwiegend zu wenigen Dezimetern, die maximale Mächtigkeit zu rund 2 m festgestellt. Die Trasse durchfährt zwei Grundwasserstockwerke. In den quartären Sanden und Kiesen (Schicht 3) ist ein Porengrundwasserleiter ausgebildet, der im westlichen Bauabschnitt mit dem dort tief reichenden Pliozän (Schicht 4) hydraulisch in Verbindung steht.

Innerhalb der miozänen Schichtfolgen bilden die vorherrschenden Tone (Schicht 5) Grundwassersperrschichten. Dagegen sind die eingeschalteten Sande mäßig bis stark wasserführend. Die Kalksteine bilden einen Kluftgrundwasserleiter. Im Festgestein sind sehr hohe Durchlässigkeiten möglich. Das Grundwasser in den wasserführenden Schichten des Frankfurter Tons steht gespannt an. Die Druckspiegel liegen dabei etwa auf dem Niveau des freien Grundwassers in den Schichten 3 und 4.

4 Maschineller Tunnelvortrieb in Frankfurt

In der Vergangenheit wurden die zahlreichen Tunnelvortriebe zum Aufbau eines effizienten U-Bahn-Netzes in Frankfurt fast ausschließlich in bergmännischer Bauweise unter Nutzung der Spritzbetonbauweise ausgeführt. Ein vor fast 30 Jahren in Frankfurt ausgeführter Schildvortrieb mit einem offenen Messerschield war nicht erfolgreich, ist aber aufgrund der technischen Entwicklung mit dem heutigen Stand der maschinellen Vortriebstechnik nicht vergleichbar. So standen auch für das Projekt Stadtbahn Europaviertel wegen der sehr umfangreichen, überwiegend positiven Erfahrungen Überlegungen zur Ausführung der anstehenden Vortriebe in Spritzbetonbauweise im Vordergrund. Im Gegensatz zu den üblichen Bedingungen für diese bergmännischen Vortriebe, die nahezu ausschließlich in den miozänen Tonschichten aufgeföhren wurden, sind im westlichen Bereich der für die Stadtbahn Europaviertel erforderlichen Vortriebe nichtbindige Bodenschichten zu durchfahren.

Aufgrund dieser Gegebenheiten entschloss sich die Verkehrsgesellschaft Frankfurt, die Wahl des Vortriebsverfahrens in einer umfangreichen Variantenstudie zu geotechnischen, vortriebstechnischen sowie genehmigungsrechtlichen Risiken und wirtschaftlichen Aspekten untersuchen zu lassen. Dabei wurden sowohl bergmännische Vortriebe mit unterschiedlichen zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen, wie z. B. Baugrundvereisung, Injektionen und Grundwasserentspannung, als auch maschinelle Vortriebe in einer Vorplanung untersucht und sowohl im bauherenseitigen Planungsteam als auch durch Planer sowie externe Prüfer und Sachverständige bewertet. Als Ergebnis wurde einvernehmlich die Ausführung eines maschinellen Vortriebs als Grundlage für die weitere Entwurfs- und Ausführungsplanung festgelegt.

Wegen der auf der Vortriebsstrecke stark wechselnden Bodenverhältnisse zwischen den Bereichen westlich und östlich der Station Güterplatz werden grundsätzlich hohe Anforderungen an die Maschinenteknik, insbesondere zur Stützung der Ortsbrust, gestellt. Um auf die unterschiedlichen Bodenverhältnisse reagieren zu können, kommen Schildmaschinen mit Vollschnittabbau und Flüssigkeitsstützung der Ortsbrust (Hydro- oder Mixschild) und Schildmaschinen mit Vollschnittabbau und Erddruckstützung der Ortsbrust (EPB- oder Erddruckschild) in Betracht.

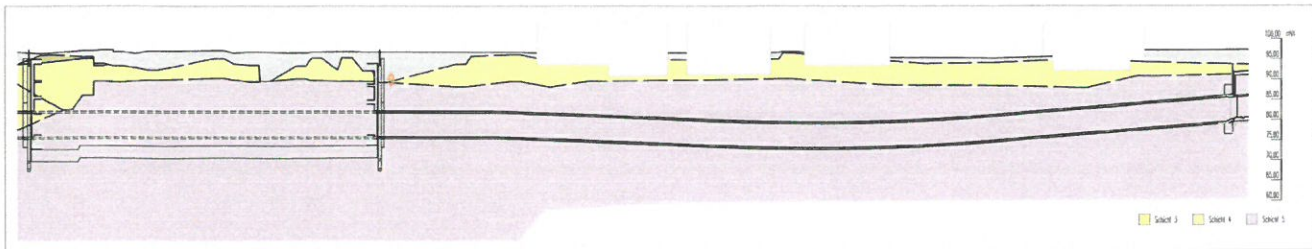


Bild 4 Geologischer Längsschnitt – Bereich Ost

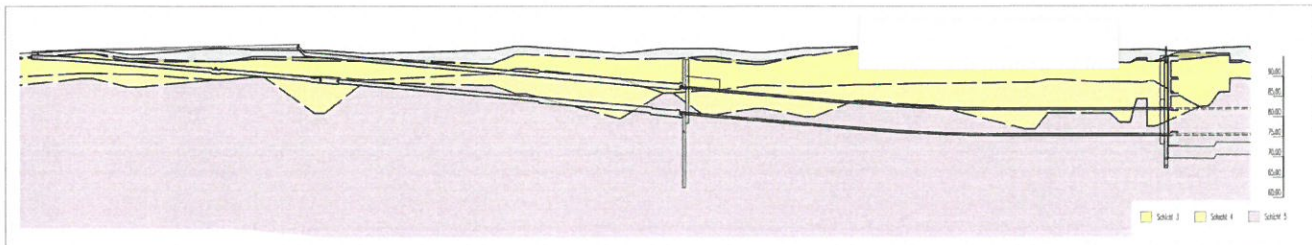


Bild 5 Geologischer Längsschnitt – Bereich West

4.1 Geotechnische Randbedingungen

Der Untergrund im Bereich des zu planenden Tunnels in geschlossener Bauweise zeichnet sich durch sehr große Inhomogenität aus, wobei im Bereich der unterirdischen Station Güterplatz ein deutlicher Wechsel der Baugrundverhältnisse vorliegt. Während die Ostvortriebe ausschließlich in den Schichten des Frankfurter Tons liegen, befinden sich wesentliche Querschnittsteile der Westvortriebe auch in den überlagernden nichtbindigen Schichten des Tertiärs und in geringen Teilen sogar in den nichtbindigen Schichten des Quartärs. Anhand der geologischen Längsschnitte (vgl. Bilder 4 und 5) wurden für die beiden Tunnelvortriebe die jeweiligen Anteile der einzelnen Bodenschichten überschlägig ermittelt:

Schicht 4a (Pliozäne Sande und Kiese):	ca. 8.700 m ³ (13,5 %)
Schicht 4b (Pliozäne Schluffe und Tone):	ca. 1.500 m ³ (2,3 %)
Schicht 5a (Miozäne Sande):	ca. 6.400 m ³ (9,9 %)
Schicht 5b (Miozäne Tone):	ca. 44.300 m ³ (68,7 %)
Schicht 5c (Miozäne Kalksteinbänke):	ca. 3.700 m ³ (5,7 %)

Für die weitere Bewertung der möglichen Vortriebsverfahren wurden zusätzlich folgende Kriterien untersucht:

- Verklebungspotenzial
Die ausgeprägt plastischen Tone, die in beiden Tunnelabschnitten (West und Ost) angetroffen werden, sind nach den bekannten Beurteilungskriterien als Böden mit hohem Verklebungspotenzial einzustufen. Die Beherrschung der Verklebungproblematik muss in jedem Fall bei der Maschinenkonzeption besondere Beachtung finden. Zusätzlich sind der Schneiradanddruck und das Drehmoment ausreichend hoch festzulegen. Diese beiden Parameter wurden in der Vergangenheit bei Vortrieben in bindigen Böden manchmal zu niedrig angesetzt.
- Kalksteinbänke
Die Abbaubarkeit der vorhandenen Kalksteinbänke ist ein weiteres Kriterium für die Maschinenauswahl. Steinbrecher sind nur bei Flüssigkeitsstützung möglich. Der erforderliche Abbau der vorhandenen Kalksteinbänke allein mit Disken-Meißeln (EPB-Schild) ist abhängig von der Bettung der Kalksteinbänke im Ton, der Anordnung und dem Spurenverlauf der Disken.

- Abrasivität
Die pliozänen Sande und Kiese der Schicht 4a sind als abrasiv sowie die Festgesteine (Kalksteinbänke) der Schicht 5c als abrasiv bis sehr abrasiv zu bezeichnen. Vor dem zweiten Vortrieb kann ggf. ein Werkzeugwechsel vorgenommen werden.
- Vortriebsbedingte Setzungen
Anhand der vorgenommenen Setzungsberechnungen werden bei entsprechendem Vortrieb unabhängig vom gewählten Vortriebsverfahren Setzungen an der Geländeoberfläche von etwa 1,0 bis 2,0 cm erwartet. Die Verträglichkeit dieser Setzungen und der daraus resultierenden Winkelverdrehungen der betroffenen Gebäude mit Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit wurde in Abstimmung mit dem geotechnischen Berater und dem tunnelbautechnischen Prüfsachverständigen nachgewiesen.

4.2 Technische Randbedingungen

Bei der Auswahl der Tunnelvortriebsmaschine und des zugehörigen Vortriebs sind zusätzlich weitere technische Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Trassierung und Gradienten
In der Rampe im Boulevard Ost östlich der Emser Brücke wird die Stadtbahntrasse mittig im Verkehrsraum an die Oberfläche geführt. Damit stellt die Emser Brücke einen wesentlichen Zwangspunkt für Trassierung und Gradienten dar. Weiterer Zwangspunkt ist das Ende der offenen Bauweise, das durch die vorhandene Einfahrtsrampe zu den Untergeschossen des Einkaufszentrums Skyline Plaza vorgegeben wird. Weitere Zwangspunkte für die Trassierung und die Gradienten stellen die geplante Station Güterplatz, die bestehende bzw. geplante Bebauung im Bereich der eigentlichen Tunnelstrecke sowie der Bestandsanschluss im Bereich des Platzes der Republik dar.
- Überschchnitt und Bautoleranzen
Bei der weiteren Auswahl des Vortriebsverfahrens ist die Problematik des Verklebens der Maschine zu beachten. Dabei sind vor allem die auszuführenden Raumkurven mit kleinem Radius von ca. 200 m zu berücksichtigen. Zur Verringerung der Verklebungproblematik ist in der Regel der Überschchnitt möglichst groß zu wählen. Dies wurde bereits in der Planung durch Festlegung der Auffahrttoleranz von 10 cm und eines planmäßi-

Stadtbahn Europaviertel Frankfurt

gen Ringspalts inkl. Konizität des Schildmantels von 15 cm berücksichtigt. Aufgrund der engen Radien wurde zusätzlich die Länge der einzelnen Tübbingringe auf 1,20 m begrenzt.

- Bergung von Hindernissen

Insbesondere im Westvortrieb ist mit entspannten Litzenankern sowohl innerhalb des Tunnelquerschnitts als auch des Tunnel-schutzraums zu rechnen. Dementsprechend können durch diese Hindernisse Risiken für das Bauverfahren bestehen. Je nach tatsächlicher Lage müssen diese Hindernisse aus dem Schildvortrieb heraus geborgen werden können. Bei natürlichen Hindernissen wie z. B. den Kalksteinbänken kann bereits bei der Planung der Schildmaschine durch Wahl und Anordnung der Werkzeuge das Risiko erheblich verringert werden.

- Separation der Aushubböden

Die Korngrößenverteilung der Tone unterscheidet sich nur wenig von der des Bentonits der Stütz- und Fördersuspension. Die Suspension lädt sich in solchen Fällen erfahrungsgemäß stark mit den Feinstanteilen des Bodens auf. Aufgrund der thixotropen Eigenschaften des Bentonits kann die Entwässerung des sich bildenden Schlammes Probleme bereiten, was bei der Konzeptionierung der Vortriebsmaschine berücksichtigt werden muss. Es ist insbesondere auf die Integration von Zentrifugen und Filterpressen, die zur Separierung und Entwässerung der feinen Bodenbestandteile benötigt werden, Rücksicht zu nehmen. Die Vorhaltung entsprechender Bauteile der Separierung in ausreichender Anzahl bestimmt damit letztendlich die mögliche Vortriebsgeschwindigkeit.

4.3 Auswahl des Vortriebsverfahrens

Die geotechnischen und technischen Randbedingungen zur Auswahl des am besten geeigneten Vortriebsverfahrens bei grundsätzlicher Wahl eines maschinellen Vortriebs wurden detailliert bewertet. Dabei wurde festgestellt, dass die komplexen Randbedingungen im Projekt Stadtbahn Europaviertel keine eindeutige Auswahl einer Tunnelvortriebsmaschine zulassen. Grundsätzlich existiert kein Kriterium, das den Vortrieb mit einem Mixschild oder einem Erddruckschild ausschließen würde. Es wird davon ausgegangen, dass die sichere Ausführbarkeit des vorgesehenen Tunnelvortriebs sowohl bei Wahl einer Vortriebsmaschine mit Flüssigkeitsstützung als auch mit Erddruckstützung möglich ist. Im Ergebnis dieser Untersuchungen haben sich Bauherr und Planer dazu entschlossen, die Auswahl des Vortriebsverfahrens dem Wettbewerb des Vergabeverfahrens zu überlassen.

5 Herausforderungen für den Spezial-tiefbau im Frankfurter Ton

Die besonderen Herausforderungen für den Spezialtiefbau ergeben sich beim Bau der Startbaugrube für die Tunnelvortriebsmaschinen und insbesondere beim Bau der in offener Bauweise herzustellenden Station Güterplatz. Die Station Güterplatz ist südlich des Geländes des Einkaufszentrums Skyline Plaza unterhalb der Europaallee geplant und wird mit einer Bahnsteiglänge von 105 m in doppelter Tiefenlage mit einer B-Ebene/Verteiler-ebene als einzelliger Stahlbeton-Rechteckrahmen hergestellt (Bild 6). Die Schienenoberkante liegt im Stationsbereich bei 77,00 m ü. NN, so dass sich Baugrubentiefen zwischen 23 und 24 m einstellen. Die Erschließung der Bahnsteige erfolgt ausgehend von vier Zugangsbauwerken über die B-Ebene (Westkopf/Ostkopf). Es sind zwei Auf- bzw. Abgänge im westlichen Bereich (Anschluss Frankenallee) und zwei im östlichen Bereich

(vor dem Eingang des Einkaufszentrums Skyline Plaza und dem Anschluss Güterplatz) vorgesehen.

Aufgrund einer Baugrubentiefe von bis zu 24 m, dem hoch anstehenden Grundwasser, der angrenzenden Bebauung und der Leitungstrassen wird für die Baugrubenwände ein massives, verformungsarmes und wasserundurchlässiges vertikales Verbausystem in Form einer überschnittenen Bohrpfahlwand gewählt (Bild 7). Bis Anfang der 1990er-Jahre wurden derart tiefe Baugruben in Frankfurt/Main aufgrund von wirtschaftlichen und bauzeitlichen Vorteilen in der Regel mit Grundwasserabsenkung und wasserundurchlässigem Verbau ausgeführt [1]. Infolge der aktuellen Anforderungen des Wasserrechts konnte für die Planung der Baugrube Station Güterplatz weder eine Grundwasserabsenkung noch eine seitliche Entspannung des Wasserdrucks mittels Entspannungsanzlen zur Reduktion der Belastungen auf die Verbauwand vorgesehen werden.

Die maximale Tiefe einer rückverankerten Baugrube liegt, abhängig von lokalen Randbedingungen des Frankfurter Tons und ohne zusätzliche Maßnahmen zur Reduktion der Wasserdruckbelastung auf die Verbauwand, bei ca. 14 bis 20 m [1]. Aus diesem Grund wurde für die Baugrube Station Güterplatz eine massive, mehrlagige innere Aussteifungskonstruktion aus Stahl und Stahlbeton gewählt. Aufgrund der Baugrundverhältnisse ist eine zusätzliche Stützung des Fußauflagers durch eine Sohlsteife vorgesehen, die bereits deutlich vor Erreichen des Endaushubzustands unterhalb der späteren Gründungsebene herzustellen ist. Die Herstellung der Sohlsteife ist in Form eines Trägerrostes mit Bohrpfählen geplant, die unterhalb der Baugrubensohle betoniert werden. Die Leerbohrungen oberhalb der betonierten Strecke sind mit einem Flüssigboden, einem Füller bzw. einer Dichtwandmasse zu verfüllen. Der kraftschlüssige Anschluss des Pfahlrostes an die Bohrpfahlwand erfolgt mittels Düsenstrahlkörpern. Als Alternative zur geplanten Sohlsteife in Betonbauweise mittels Bohrpfählen wäre eine Sohlsteife als Injektions- oder Düsenstrahlsohle denkbar. Aufgrund der enormen Tiefenlage und der damit verbundenen Bohrabweichungen kann dabei jedoch eine geschlossene Sohle nicht ausreichend sicher gewährleistet werden.



Bild 6 Blick in die geplante Station Güterplatz

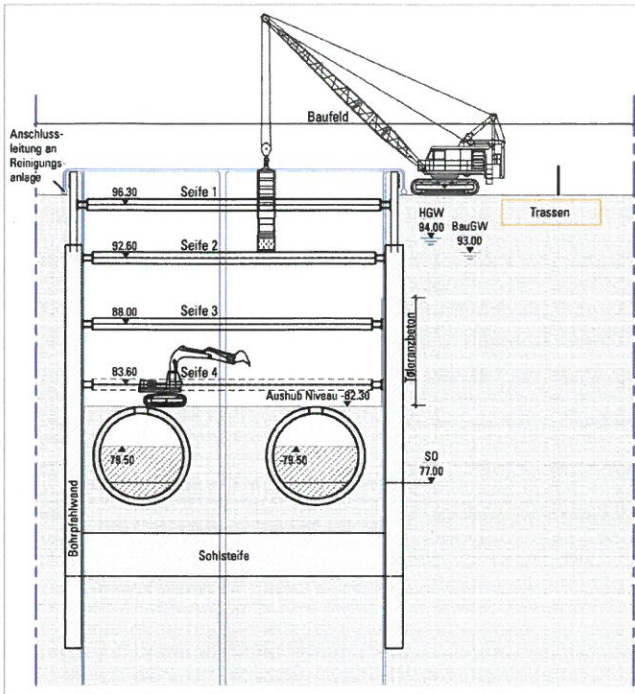


Bild 7 Geplante Baugrube Station Güterplatz

mit den beteiligten geotechnischen Fachgutachtern und Prüfingenieuren die theoretischen Ansätze der Nachweisführung entwickelt. Insbesondere bei Anwendung des Bettungsmodulverfahrens nach EB 102 ergab sich die besondere Situation, dass die nach EAB Kapitel 4.5 Absatz 10.a) geforderte Grenzzustandsbedingung ab einem bestimmten Aushubniveau nicht erfüllt werden konnte. Dadurch wurde es erforderlich, Bettungsansätze für den Frankfurter Ton ohne vorgelagerten Erdruhedruck unter besonderer Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen (Sohlsteife etc.) zu entwickeln. Weitere komplexe Aufgabenstellungen ergaben sich beim Nachweis des Aufbruchs der Baugrubensohle und beim Nachweis der Gesamtstandsicherheit.

6 Ausblick

Die Spezialtiefbaumaßnahmen für den Bau der Stadtbahn Europaviertel beginnen planmäßig im Jahr 2016. Sowohl die Umsetzung eines Schildvortriebs im Frankfurter Baugrund als auch die Erstellung der tiefen Baugruben an der Station Güterplatz und der Startbaugrube stellen unter den vorhandenen Randbedingungen besondere Herausforderungen dar. Zur Gewährleistung einer sicheren Planung wurden bereits frühzeitig Prüfsachverständige für Geotechnik und Tunnelbautechnik sowie ein statisch-konstruktiver Prüfer eingeschaltet. Die Ausführung des Projekts wird dementsprechend im Sinne der Beobachtungsmethode nach Eurocode 7 zur Überwachung der Verträglichkeit der Baumaßnahmen für den Bestand und zur Kontrolle der auftretenden Verformungen und Beanspruchungen als Bestandteil der projektspezifischen Beweissicherung messtechnisch umfangreich begleitet.

Literatur

- [1] Steiger, H., Pitteloud, L.: Neue Entwicklung für die Optimierung der Bemessung von tiefen Baugruben in Frankfurt am Main. Beitrag im Rahmen des 8. Darmstädter Geotechnik-Kolloquiums am 15. März 2001; Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt (Deutschland), 2008.

Anzeige

Vermessung
Geotechnik
Geoinformatik
Entwicklung

intermetric
Das richtige Maß

BEVOR DER TUNNEL KOMMT ...

... kommt beim Tunnelbau die Geometrie. Modernste Vortriebsverfahren sorgen dafür, dass das Soll zum Ist wird und die Röhren am Ende millimetergenau aufeinander treffen.



intermetric GmbH | Industriest. 24 | 70565 Stuttgart | T +49 (711) 780039-2 | www.intermetric.de

NBS Wendlingen-Ulm, Süportal des Albstadt-Tunnels