

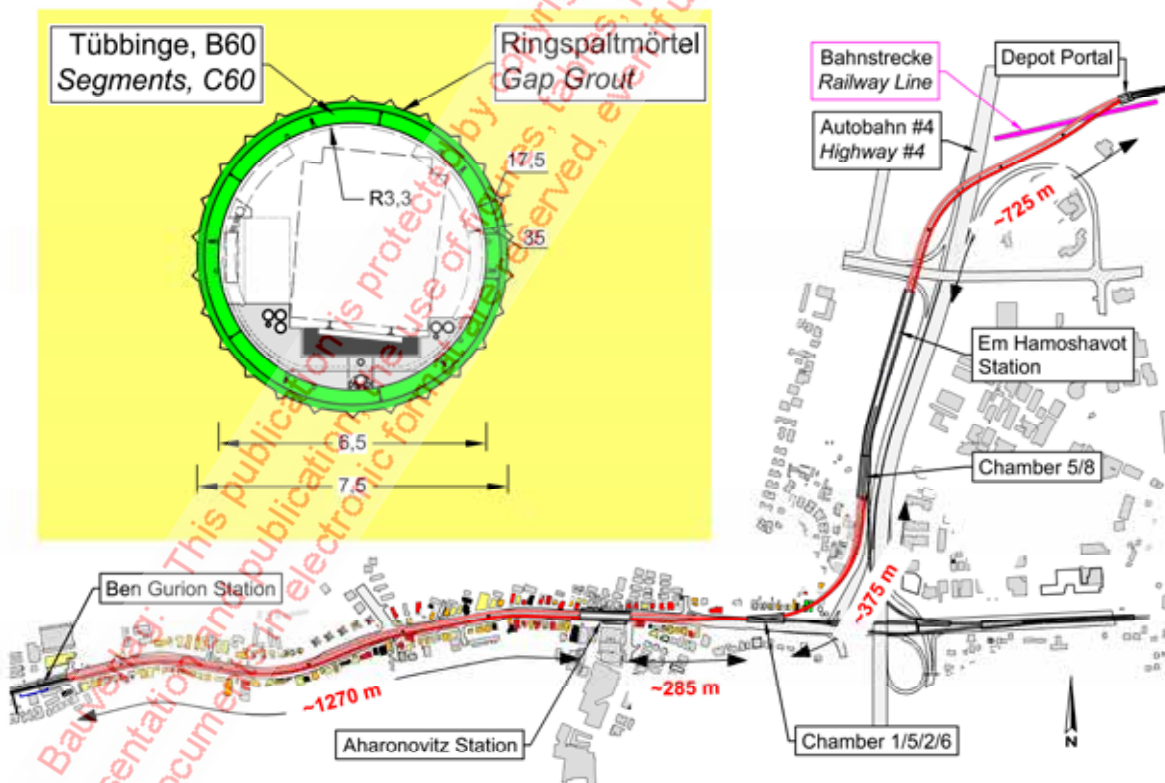
# Red Line Tel Aviv: Planning and Construction of the TBM Tunnels of the Eastern Section (Part 1)

## Red Line Tel Aviv: Planung und Bau der TBM-Tunnel des östlichen Streckenabschnitts (Teil 1)

The Red Line is the first line of the Tel Aviv urban railway. 2x2.7 km tunnels were driven using two EPB tunnel boring machines (EPBs) from Herrenknecht for the eastern section of the Red Line. It is being built by a joint venture comprising the Israeli construction company Danya Cebus and the Chinese contractor CCECC. The WBI GmbH carried out the detailed design and accompanied construction activities on behalf of the consortium. This report provides an overview of the project and the ground conditions. Furthermore, the planning, lab tests and findings from executing the TBM drives from the Depot portal to Ben Gurion Station are described.

Die Red Line ist die erste Linie der Stadtbahn in Tel Aviv. Für den östlichen Abschnitt der Red Line, der von einem Konsortium der israelischen Baufirma Danya Cebus und der chinesischen Baufirma CCECC gebaut wird, wurden 2 x 2,7 km Tunnel mit zwei EPB-TBM der Firma Herrenknecht aufgeföhren. Die WBI GmbH hat im Auftrag des Joint Ventures die Ausführungsplanung und die Begleitung der Bauarbeiten ausgeführt. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über das Projekt und die Baugrundverhältnisse. Außerdem werden die Planung, Laborversuche und Erfahrungen aus der Bauausführung der TBM-Vortriebe vom Depot-Portal bis zur Station Ben Gurion beschrieben.

Dr.-Ing. MARTIN WITKE, Managing partner/Geschäftsföhrender Gesellschafter  
Dr.-Ing. PATRICIA WITKE-GATTERMANN, Authorised officer/Prokuristin  
Prof. Dr.-Ing. WALTER WITKE, Managing Director/Geschäftsföhner  
WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland



1 Red Line Tel Aviv, plan and typical cross section for the TBM-tunnels of the eastern section  
Red Line Tel Aviv, Lageplan und typischer Regelquerschnitt für die TBM-Strecken im östlichen Abschnitt

## 1 Introduction

The Red Line represents the first line of Tel Aviv's twin-track urban light railway. The twin-track light rail line starts to the south of Jaffa close to the coast, runs in a north-easterly direction through Tel Aviv and then eastwards along Jabotinsky Road through Ramat Gan, Bnei Brak until reaching Petach Tikva [1]. Along the #4 motorway it links up towards the north with the Depot that is also under construction. Roughly 11 km of the altogether 24 km long route run in tunnels. Construction work was commissioned in two sections in 2015 and 2016. The JV Danya Cebus/CCECC received the contract for the eastern section in Ramat Gan and Bnei Brak.

## 2 Project

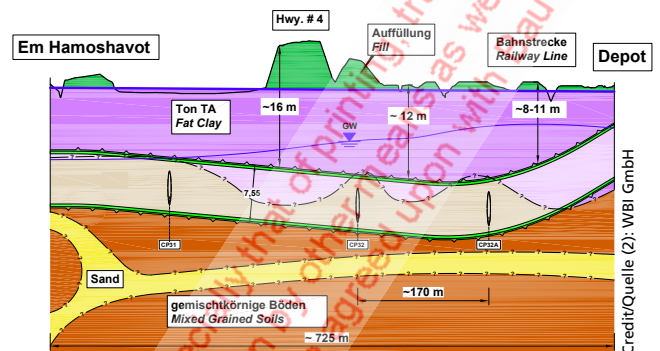
2 x 2655 m  $\approx$  5.3 km of tunnels were constructed for the project section dealt with in this article (Fig. 1). The two single-track tunnel tubes have an internal diameter amounting to 6.5 m. The cross-section, the route alignment and the gradients were devised for a design speed of a maximum of 80 km/h.

The tunnels were driven using two EPBs made by Herrenknecht from the Depot portal in the north-east. In the first roughly 725 m long route section, the tubes are linked by three cross-passages. The tunnels underpass an existing railway line directly southwest of the portal at a glancing intersection (Fig. 1). Here, the overburden amounts to roughly 8 to 11 m (Fig. 2). Subsequently, the #4 motorway and the Em Hamoshavot Bridge were undertunnelled prior to the tunnels arriving at the Em Hamoshavot Station.

The two TBMs were then pulled through the previously excavated Em Hamoshavot Station to the construction pit for Chamber 5/8. From here, the drives leading to Ben Gurion Station were started. The tubes immediately to the south of Chamber 5/8 and between Aharonovitz and Ben Gurion Stations are located next to each other. In the last-mentioned, approx. 1270 m long section the tubes are linked to one another by five cross-passages. The tubes are located one above the other in the zone east and west of the intersection Chamber 1/5/2/6 constructed by cut-and-cover. The tunnels have a maximum longitudinal inclination of 6 %. The smallest design radius amounts to 220 m.

## 3 Subsoil and Groundwater Conditions

The route section from the Depot in the northeast to Em Hamoshavot Station is located in fat clay and mixed-grained soils (Fig. 2, [1, 2]). A continuous layer of slightly silty and gravelly fine to medium sands is located below the tunnel tubes. The groundwater level in this tunnel section is to be found on the same level and above the



2 Section Depot portal – Em Hamoshavot Station, geological longitudinal section

Abschnitt Depot-Portal – Station Em Hamoshavot, geologischer Längsschnitt

## 1 Einleitung

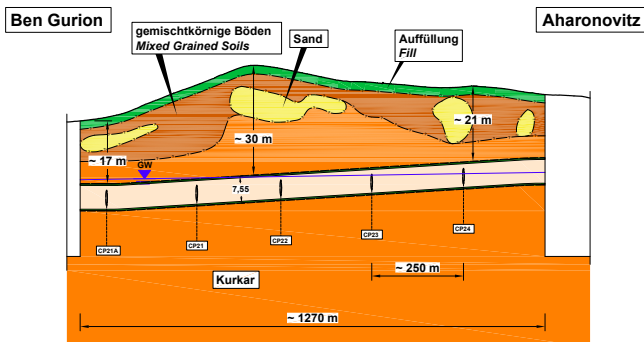
Die Red Line ist die erste Linie der Stadtbahn in Tel Aviv. Die zweigleisige Stadtbahn beginnt südlich von Jaffa in der Nähe der Küste, verläuft in Richtung Nordosten durch Tel Aviv und führt danach in östlicher Richtung entlang der Jabotinsky Straße durch Ramat Gan, Bnei Brak bis nach Petach Tikva [1]. Entlang der Autobahn #4 erfolgt ein Anschluss in nördlicher Richtung an das ebenfalls im Bau befindliche Depot. Von der insgesamt 24 km langen Strecke verlaufen ca. 11 km in Tunneln. Die Bauarbeiten wurden in den Jahren 2015 und 2016 in zwei Bauabschnitten vergeben. Der Auftrag für den östlichen Abschnitt in Ramat Gan und Bnei Brak ging an das JV Danya Cebus/CCECC.

## 2 Projekt

Für den im Rahmen dieses Beitrags behandelten Projektabschnitt wurden insgesamt 2 x 2655 m  $\approx$  5,3 km Tunnel gebaut (Bild 1). Die beiden eingleisigen Tunnelröhren haben einen Innendurchmesser von 6,5 m. Der Querschnitt, die Trassenführung und die Gradienten wurden für Entwurfsgeschwindigkeiten bis max. 80 km/h ausgelegt.

Die Tunnel wurden ausgehend vom Depot-Portal im Nordosten mit zwei EPB-TBM der Firma Herrenknecht aufgeföhren. Im ersten ca. 725 m langen Streckenabschnitt sind die beiden Röhren durch drei Querschläge miteinander verbunden. Die Tunnel unterqueren unmittelbar südwestlich vom Portal eine bestehende Eisenbahnstrecke in einem schleifenden Schnitt (Bild 1). Die Überlagerung beträgt hier ca. 8 bis 11 m (Bild 2). Im Anschluss wurden die Autobahn #4 und die Em Hamoshavot Brücke unterfahren, bevor die Tunnel die Station Em Hamoshavot erreichten.

Die beiden Tunnelvortriebsmaschinen wurden anschließend durch die bereits ausgehobene Station Em Hamoshavot bis in die Baugrube der Chamber 5/8 durchgezogen. Von hier wurden die Vortriebe in Richtung der Station Ben Gurion begonnen. Die Röhren liegen unmittelbar südlich der Chamber 5/8



**3** Section Aharonovitz Station – Ben Gurion Station, geological longitudinal section  
Abschnitt Station Aharonovitz – Station Ben Gurion, geologischer Längsschnitt



**4** Cores taken from drillings in Kurkar  
Bohrkerne aus dem Kurkar

Credit/Quelle (4): WBI GmbH

tunnel roof. As mentioned, at this point the tunnel passes beneath a railway line and the #4 motorway as well as several utilities, with shallow overburden.

The roughly 1.3 km long section between Aharonovitz and Ben Gurion Stations lies in the Kurkar formation (Fig. 3). This is a sediment found in large areas of the city of Tel Aviv, which can be described as gravel-sand as far as its gradation is concerned [1, 3]. The Kurkar is to be found in various forms from hard rock to loose material (Fig. 4).

und im Streckenabschnitt zwischen den Stationen Aharonovitz und Ben Gurion nebeneinander. Im letztgenannten, ca. 1270 m langen Abschnitt sind die Röhren durch fünf Querschnitte miteinander verbunden.

Im Bereich östlich und westlich des in offener Bauweise errichteten Kreuzungsbauwerks der Chamber 1/5/2/6 liegen die Röhren übereinander. Die Tunnel besitzen eine maximale Längsneigung von 6 %. Der kleinste planmäßige Radius beträgt 220 m.



**5** TBM S1027 inside Em Hamoshavot Station (left) and view into tunnel at Depot Portal (right)  
TBM S1027 in der Station Em Hamoshavot (links) und Blick in den Tunnel am Depot-Portal (rechts)

In addition, poorly-graded sands and mixed-grained soils are anticipated in this tunnel section. The groundwater level is to be found at the height of the tunnel cross-section between Aharonovitz and Ben Gurion Stations and just above the roof in the west of this section (**Fig. 3**). The overburden varies from 17 to 30 m. The tunnels here are located under Jabotinsky Road.

Both the Kurkar as well as the poorly-graded sands have a relatively high permeability of roughly  $10^{-4}$  m/s. The mixed-grained soils and the fat clays to be found between the Depot portal and Em Hamoshavot Station on the other hand, have a low permeability [1, 2].

#### 4 Tunnel Boring Machines

The two EPB TBMs deployed for constructing the tunnel (**Fig. 5**) were ideally suited for use in the section comprising clay and mixed-grained soils. For the sections located between Chamber 5/8 and Ben Gurion Station in the Kurkar and sands, polymers, foams and the addition of fines at the cutterhead as well as in the extraction chamber were required in order to produce an earth mud to obtain the required support pressure. The machines were provided with corresponding equipment.

The cutterhead, which had a 7.55 m bore diameter when being fitted with new tools, was provided with 17" roller disc cutters, rippers and scrapers. The three-part shield mantle is roughly 10 m in length and was designed with a slightly tapering shape with the diameter diminishing towards the rear. As a result, the steering gap increases from approx. 4 to 6 cm from the cutterhead to the tail-skin.

Four lines for grouting the annular gap mortar in the 17.5 cm thick annular gap are located at the shield tail (**Fig. 1**). Each of the machines is provided with 16 hydraulic jacks, which rest on the 35 cm thick segments and by means of which a maximum total thrust of 54 000 kN can be produced. There is the possibility of introducing bentonite slurry into the steering gap at the front and middle parts of the shield to limit settlements and if needed reduce friction.

Owing to the pronounced longitudinal gradient and the narrow curve radii it was decided to supply the machine via Multi-Service Vehicles (MSVs). The excavated material was removed via conveyor belt. The machine and performance data were prepared as usual and evaluated continuously by WBI using the WBIM Supervision module [4].

#### 5 Planning the Segments

As described the segments for the mechanically driven tunnel are 35 cm thick. The individual rings consist of five segments and a keystone. 1.5 m wide segments were

### 3 Baugrund- und Grundwasser- verhältnisse

Der Streckenabschnitt vom Depot im Nordosten bis zur Station Em Hamoshavot kommt in einem ausgeprägt plastischen Ton und in gemischtkörnigen Böden zu liegen (**Bild 2**, [1, 2]). Unterhalb der Tunnelröhren steht hier eine durchgehende Schicht aus schwach schluffigen, schwach kiesigen Fein- bis Mittelsanden an. Der Grundwasserspiegel liegt in diesem Tunnelabschnitt in Höhe und oberhalb der Tunnelrinne. Der Tunnel unterfährt hier, wie erwähnt, mit geringer Überdeckung eine Bahnstrecke und die Autobahn #4 sowie verschiedene Leitungen.

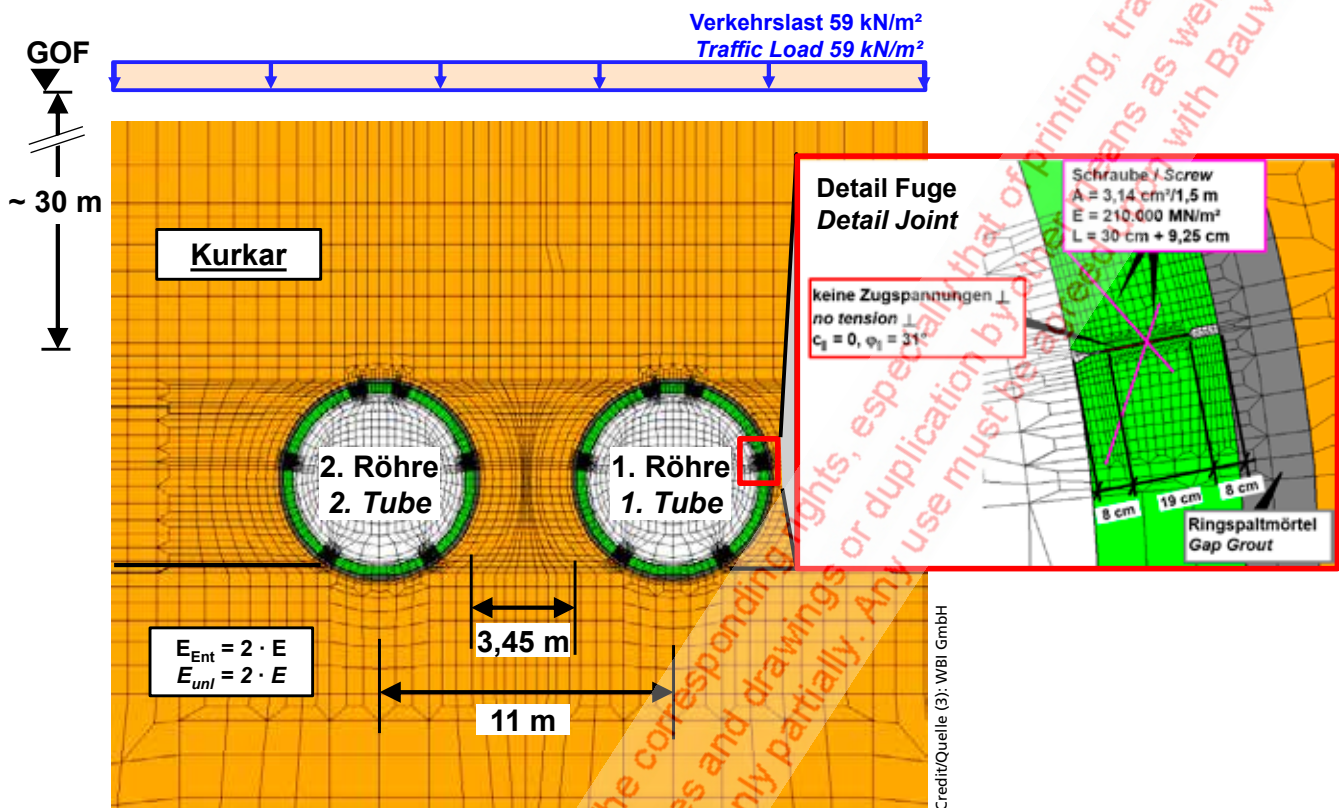
Der ca. 1,3 km lange Abschnitt zwischen den Stationen Aharonovitz und Ben Gurion kommt im Kurkar zu liegen (**Bild 3**). Das ist ein in weiten Teilen der Stadt Tel Aviv anstehendes Sediment, das hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung als Kies-Sand angesprochen werden kann [1, 3]. Der Kurkar steht in verschiedenen Zustandsformen vom festen Fels bis zu einem Lockergestein an (**Bild 4**). Außerdem sind in diesem Tunnelabschnitt enggestufte Sande und gemischtkörnige Böden zu erwarten. Der Grundwasserspiegel liegt zwischen den Stationen Aharonovitz und Ben Gurion in Höhe des Tunnelquerschnitts und im Westen dieses Abschnitts etwas über der Rinne (**Bild 3**). Die Überlagerung beträgt zwischen 17 und 30 m. Die Tunnel liegen hier unterhalb der Jabotinsky Straße.

Sowohl der Kurkar als auch die eng gestuften Sande weisen eine vergleichsweise hohe Durchlässigkeit in der Größenordnung von  $10^{-4}$  m/s auf. Die gemischtkörnigen Böden und die zwischen dem Depot-Portal und der Station Em Hamoshavot anstehenden ausgeprägt plastischen Tone besitzen dagegen eine geringere Durchlässigkeit [1, 2].

#### 4 Tunnelbohrmaschinen

Die beiden für den Bau der Tunnel eingesetzten EPB-TBM (**Bild 5**) waren für den Einsatz in der Strecke im Ton und den gemischt-körnigen Böden optimal geeignet. Für die im Kurkar und in den Sanden liegenden Streckenabschnitte zwischen der Chamber 5/8 und der Station Ben Gurion waren Polymere, Schäume und eine Feinstoffzugabe am Bohrkopf sowie in der Abbaukammer erforderlich, um einen Erdbrei erzeugen und damit den erforderlichen Stützdruck aufbringen zu können. Entsprechende Einrichtungen wurden bei den Maschinen vorgesehen.

Der Bohrkopf, der bei Bestückung mit neuen Werkzeugen einen Bohrdurchmesser von 7,55 m aufweist, war mit 17" Rollenmeißeln, Schälmessern, Reißzähnen und Räumern belegt. Der aus drei Teilen bestehende Schildmantel besitzt eine Länge von ca. 10 m und wurde leicht konisch mit einem von vorne nach hinten abnehmenden Durchmesser ausgeführt, so dass der Steuerspalt vom Bohrkopf bis zum Schildschwanz von ca. 4 cm auf 6 cm zunimmt.



6 FE-analyses for dimensioning of the segmental lining, FE-mesh, example  
FE-Berechnungen für die Bemessung der Tübbingringe, FE-Netz, Beispiel

mainly used. 1.2 m wide segments were also installed in sections with narrow curve radii. The ring concicity amounts to around 5 cm.

Gaskets produced by ES Rubber were concreted into the segments. The gaskets were dimensioned to withstand 2-times of the design water pressure amounting to 2.1 bar. The contact area between the segments is designed to amount to 19 cm (Fig. 6).

The stability analyses and the prediction of subsidence were carried out with the FE method using the WBI in-house FEST03 programme system [5]. Fig. 6 displays the FE-mesh for dimensioning the segments for the tunnel section between Aharonovitz and Ben Gurion Stations. Here the tunnels have a minimum centre distance of 11 m, so that a 3.45 m wide pillar of soil remains between the two tubes. The thickness of the pillar when exiting the construction pit at the Depot portal is even less. These narrow pillars of soil have an unfavourable effect on the loading of the segments.

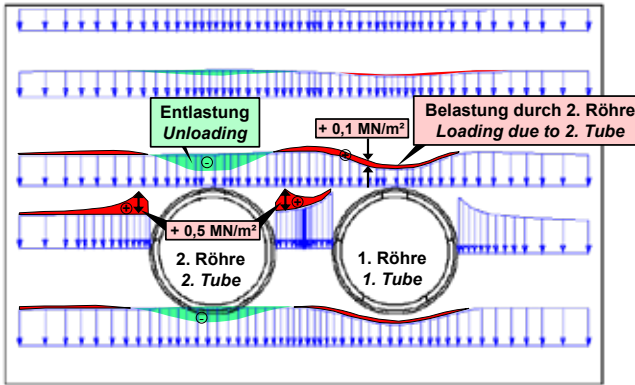
The segments are simulated in the FE-mesh by three rows of elements, while the annular gap is represented by two rows. The FE-mesh around the joints is rather fine (Fig. 6, on the right). No tensile stresses can be transmitted perpendicularly to the 19 cm wide contact area.

Am Schildschwanz befinden sich vier Lisenen zum Einbringen des Ringspaltmörtels in den 17,5 cm dicken Ringspalt (Bild 1). Die Maschinen sind mit je 16 Doppelpressen ausgerüstet, die sich auf den 35 cm dicken Tübbingen abstützen und mit denen eine maximale Vorschubkraft von 54 000 kN erzeugt werden kann. Zur Begrenzung der Senkungen und ggf. zur Verringerung der Reibung wurde die Möglichkeit vorgesehen, im Bereich des Front- und des Mittelschildes Bentonitsuspension in den Steuerspalt einzubringen.

Aufgrund der großen Längsneigung und der engen Kurvenradien wurde entschieden, die Maschine über Multi-Service-Vehicles (MSV) zu versorgen. Das Aushubmaterial wurde per Förderband abtransportiert. Die Maschinen- und Vortriebsdaten wurden wie üblich bereitgestellt und von WBI über das Modul Supervision von WBIM kontinuierlich ausgewertet [4].

## 5 Tübbingplanung

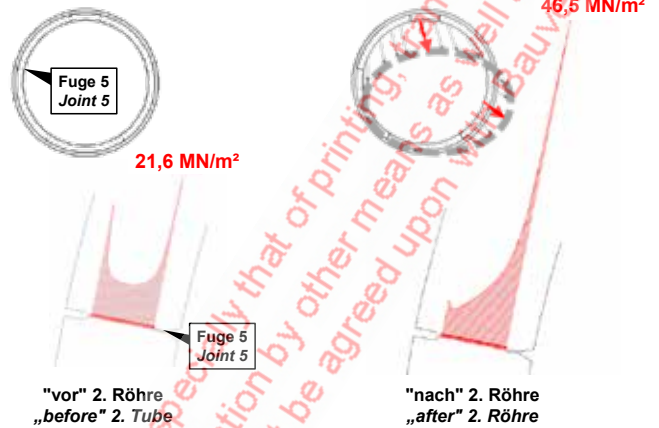
Die Tübbinge des maschinell vorgetriebenen Tunnels haben wie beschrieben eine Dicke von 35 cm. Die einzelnen Ringe bestehen aus fünf Tübbingen und einem Schlussstein. Es wurden überwiegend Tübbinge mit einer Breite von 1,5 m eingesetzt. Wegen der örtlich notwendigen geringen Kurvenradien wurden auch Tübbinge mit einer Breite von 1,2 m ausgeführt. Die Konizität des Rings beträgt ca. 5 cm.



**7** Change of vertical stresses in the ground as a consequence of heading the second tube  
 Änderung der Vertikalspannungen im Baugrund infolge Bau der 2. Röhre

Parallel to this the shear strength is prescribed by a 31° angle of friction. A guiding rod is foreseen at the key-stone. The bolts are simulated as truss elements made of steel.

In **Figs. 7 + 8** exemplarily some analysis results are shown. The vertical normal stresses in horizontal sections after driving the first tube reveal an arching effect around the tunnel (**Fig. 7**, blue). Above the roof unloading can be visualized with an increase of stresses adjacent to the tunnel walls. As a consequence of driving the second tube the pillar between the tubes is additionally loaded (shown in red). Also the vertical stresses above and adjacent to the roof of the tube that had been driven first



**8** Ovalization of the segmental ring and increase of stresses in the longitudinal joint 5 as a consequence of heading the second tube  
 Ovalisierung des Tübbingrings und Anstieg der Beanspruchung in der Längsfuge 5 infolge Bau der 2. Röhre

Die Dichtung der Firma ES Rubber wurde in die Tübbinge einbetoniert. Die Bemessung der Dichtung erfolgte für den zweifachen Bemessungswasserdruck, der 2,1 bar beträgt. Die Fugen der Tübbinge besitzen planmäßig eine Kontaktfläche von 19 cm (**Bild 6**).

Die Tunnelstatik und die Prognose der Senkungen wurde nach der FE-Methode mit dem WBI-eigenen Programmsystem FEST03 erstellt [5]. Das FE-Netz für die Bemessung der Tübbinge für den Tunnelabschnitt zwischen den Stationen Aharonovitz und Ben Gurion zeigt das **Bild 6**. Die Tunnel besitzen hier einen minimalen Achsabstand von 11 m, so dass zwischen beiden Röhren nur ein 3,45 m breiter Baugrundpfeiler verbleibt. Bei der Ausfahrt aus der Baugrube am Depot-Portal

We keep things moving.



**SCHAD**  
 Förderelemente

Friedberger Straße 20  
 D-35410 Hungen (Germany)

Tel. +49 (0) 6402-505002  
 Fax +49 (0) 6402-505003

info@schad-rollen.de  
 www.schad-rollen.de



Credit/Quelle (2): WBI GmbH

**9** View towards the tunnels at Depot portal  
Blick auf die Tunnel am Depot-Portal

increase (**Fig. 7**). The result of this load redistribution is an unfavourable additional deformation of the segmental ring in the form of an ovalisation of the first tube, which can be seen in **Fig. 8** above in superelevated form. The bending moment in the lining due to this ovalisation increases which leads to an unfavourable effect at the joints. For joint 5 at the pillar side of the first tube there is an approximately symmetric normal stress distribution with a maximum value of contact stress at the edge of approx.  $21.6 \text{ MN/m}^2$  (**Fig. 8**, on the left) prior to the second tube being excavated. As a consequence of the narrow pillar of soil between the two tubes the stress on the inner side of the joint more than doubles its value after the second tube has been driven (**Fig. 8**, on the right). At the Depot portal, where the minimum pillar thickness amounts to only approx. 70 cm (**Figs. 9 + 10**), this effect is even more severe. Here it was necessary to construct a protective diaphragm wall in the pillar before driving the tube (**Fig. 10**). As far as the other sections were concerned, it was sufficient to increase the concrete quality of the segments from its original B50 to B60.

This unfavourable stress on the side of the pillar would have been avoided or at least reduced if there had been a wider pillar between the two tubes or if the segments had been thicker [1].

The second part of the article pertaining to the tunnelling activities in the eastern section of the Tel Aviv Red Line will appear in tunnel issue 5/2019. Part 2 describes the suitable mix composition for the annular gap mortar as well as the driving operations in clay and the Kurkar formation.

ist die Pfeilerdicke noch geringer. Die schmalen Baugrundpfeiler wirken sich ungünstig auf die Beanspruchung der Tübbinge aus.

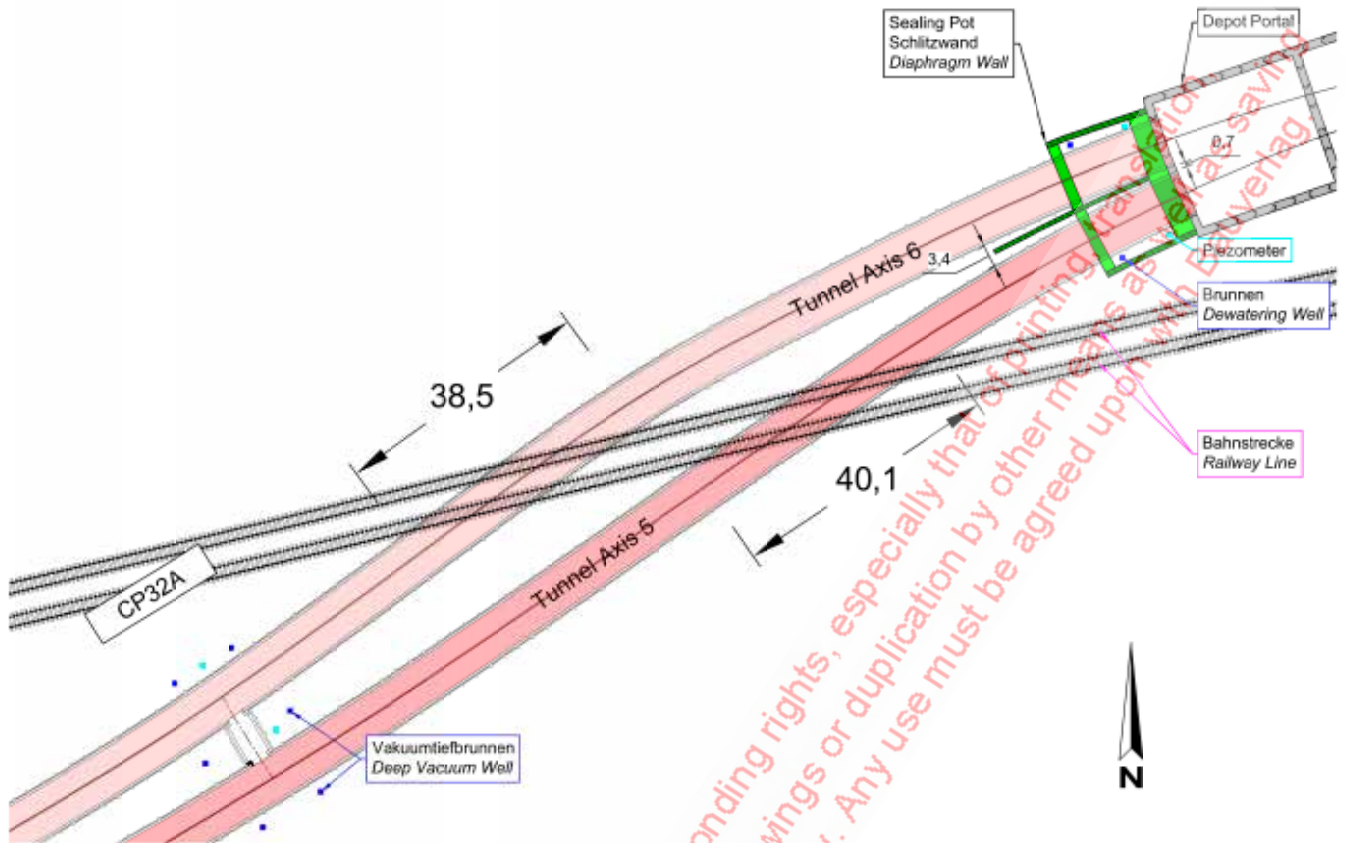
Die Tübbinge werden im FE-Netz durch drei Elementreihen, der Ringspalt wird durch zwei Elementreihen nachgebildet. Eine große Feinheit besitzt das FE-Netz im Bereich der Fugen (**Bild 6**, rechts). Senkrecht zu der 19 cm breiten Kontaktfläche können keine Zugspannungen aufgenommen werden. Parallel dazu ist die Schubfestigkeit durch einen Reibungswinkel von  $31^\circ$  vorgegeben. Im Bereich des Schlusssteins ist ein guiding rod vorgesehen. Die Schrauben werden als Stabelemente aus Stahl simuliert.

In den **Bildern 7 und 8** sind beispielhaft einige Berechnungsergebnisse dargestellt. Die vertikalen Normalspannungen in horizontalen Schnitten nach dem Auffahren der ersten Röhre zeigen eine Gewölbewirkung um den Tunnel herum (**Bild 7**, blau). Oberhalb der Firste ergibt sich eine Entlastung und seitlich der Ulmen entsteht eine Spannungserhöhung. Nach dem Auffahren der zweiten Röhre ergibt sich die in Rot dargestellte zusätzliche Belastung des Pfeilers zwischen den Röhren. Auch oberhalb und seitlich der Firste der zuerst aufgefahrenen Röhre ergibt sich eine Erhöhung der Vertikalspannungen (**Bild 7**). Die Folge dieser Lastumlagerung ist eine ungünstige zusätzliche Verformung in Form einer Ovalisierung der ersten Röhre, die in **Bild 8** oben zur Veranschaulichung überhöht dargestellt ist.

Durch die Ovalisierung erhöht sich die Biegemomentbeanspruchung. Ungünstig wirken sich die Biegemomente im Bereich der Fugen aus. Für die Fuge 5 auf der Pfeilerseite der ersten Röhre ergibt sich vor dem Auffahren der zweiten Röhre eine annähernd symmetrische Normalspannungsverteilung mit einem Maximalwert der Kontaktspannung am Rand von ca.  $21,6 \text{ MN/m}^2$  (**Bild 8**, links). Als Folge des schmalen Baugrundpfeilers zwischen beiden Röhren erhöht sich die Beanspruchung auf der Innenseite der Fuge nach dem Auffahren der zweiten Röhre auf mehr als den doppelten Wert (**Bild 8**, rechts). Im Bereich des Portals am Depot, wo die geringste Pfeilerdicke nur ca. 70 cm beträgt (**Bilder 9 und 10**) ist dieser Effekt noch ungünstiger. Hier musste vor dem Auffahren der Röhren eine abschirmende Schlitzwand im Pfeiler hergestellt werden (**Bild 10**). Für die übrigen Abschnitte war es ausreichend, die Betongüte der Tübbinge von ursprünglich B50 auf B60 zu erhöhen.

Diese ungünstige Beanspruchung auf der Pfeilerseite hätte sich durch einen breiteren Pfeiler zwischen beiden Röhren oder durch eine größere Tübbingdicke vermeiden oder zumindest verringern lassen [1].

Der zweite Teil des Artikels über die Tunnelbauarbeiten im östlichen Abschnitt der Red Line Tel Aviv wird in der tunnel Ausgabe 5/2019 erscheinen. Teil 2 behandelt die geeignete Mischungszusammensetzung des Ringspaltmörtels sowie die Vortriebsarbeiten im Ton und im Kurkar.



10 Undercrossing the railway line west of Depot portal, plan  
 Bahnunterfahrung westlich des Depot-Portals, Lageplan

#### REFERENCES/LITERATUR

- [1] Wittke, M.; Wittke, W.; Ashkenazi, S.; Gang, J.: Entwurf der Tunnel für die Red Line der Stadtbahn von Tel Aviv, Israel. Vorträge anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbautages 2017 im WBI-Center, 11.05.2017, Weinheim. WBI-PRINT 20 (free download [www.wbionline.de](http://www.wbionline.de)).
- [2] Wittke, M.; Wittke, W.; Teboulle, N.; Gang, J.: Red Line, Tel Aviv, Eastern Section – Einfluss der Eigenschaften des Ringspaltmörtels auf die Bemessung der Tübbingauskleidung. Vorträge anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautages 2018 im WBI-Center, 07.06.2018, Weinheim. WBI-PRINT 21.
- [3] Wittke, W.; Pierau, B.; Erichsen, C.: New Austrian Tunneling Method (NATM), Stability Analysis and Design. WBI-PRINT 5, 2006 (free download [www.wbionline.de](http://www.wbionline.de)).
- [4] Wittke, M.; Jakobs, C.: WBIM – sachgerechte Anwendung von BIM im Tunnelbau. Vorträge anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautages 2018 im WBI-Center, 07.06.2018, Weinheim. WBI-PRINT 21.
- [5] Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2014. ISBN-Nr.: 978-3-433-03079-0.
- [6] Thewes, M.; Budach, C.: Mörtel im Tunnelbau – Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen zur Verfüllung des Ringspaltes bei Tunnelvortriebsmaschinen, BauPortal 12/2009.

**AUCH  
ZUR  
MIETE!**

**Exakt und schnell**

Das sind die hochwertigen Akkuschaubwerkzeuge von DEVO-Tools für den industriellen Werkstatt- und Baustelleneinsatz.

Das umfangreiche Sortiment finden Sie unter [www.devo-tools.ch](http://www.devo-tools.ch).

DEVO-Tools AG

Hauptstrasse 39  
CH-4417 Zieflen

Tel. +41 61 935 97 67  
Fax +41 61 935 97 99

info@devo-tools.ch  
[www.devo-tools.ch](http://www.devo-tools.ch)