

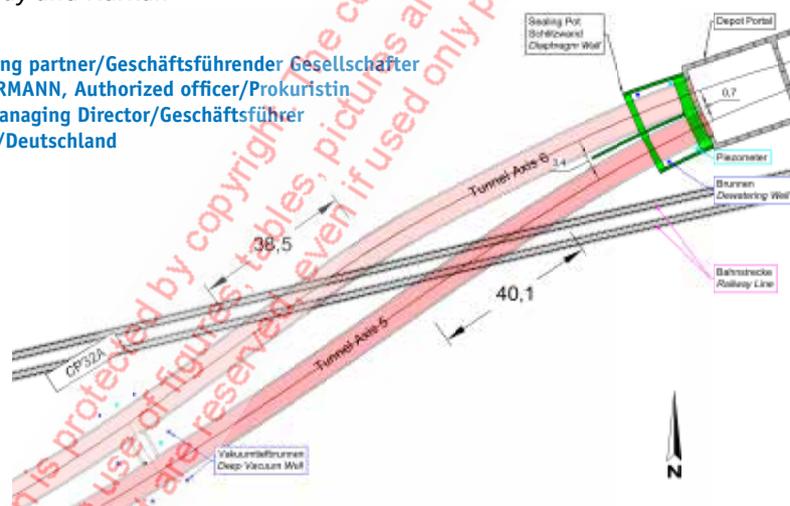
Red Line Tel Aviv: Planning and Constructing the TBM Tunnels of the Eastern Section (Part 2)

Red Line Tel Aviv: Planung und Bau der TBM-Tunnel des östlichen Streckenabschnitts (Teil 2)

The Red Line is the first line of the Tel Aviv urban railway. 2 x 2.7 km tunnels were driven using two EPB tunnel boring machines from Herrenknecht for the eastern section of the Red Line. It is being built by a consortium comprising the Israeli construction company Danya Cebus and the Chinese contractor CCECC. The WBI GmbH undertook the detailed design and accompanied construction activities on behalf of the joint venture. This report follows up on the previous one that was published in tunnel 4/2019. It deals with the appropriate mix composition of the annular gap grout and the driving activities in the tunnel sections in clay and Kurkar.

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 schließt an die Veröffentlichung in tunnel 4/2019 an und befasst sich mit der geeigneten Mischungszusammensetzung des Ringspaltmörtels und den Vortriebsarbeiten im Ton und im Kurkar.

Dr.-Ing. MARTIN WITKE, Managing partner/Geschäftsführender Gesellschafter
Dr.-Ing. PATRICIA WITKE-GATTERMANN, Authorized officer/Prokuristin
Prof. Dr.-Ing. WALTER WITKE, Managing Director/Geschäftsführer
WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland



10 Undercrossing of Railway Line west of Depot Portal, Plan

Bahnunterföhren westlich des Depot Portals, Lageplan

6 Annular Gap Grout

A cement-based mortar was used for grouting the annular gap for tunnelling the eastern section of the Tel Aviv Red Line [2]. The mixes applied are presented in Table 1. The grout properties were tested in the lab at the WBI-Center.

The fresh mortar has a density of 2.1 g/cm³. Workability was proven by means of slump tests, in which horizontal slumps of roughly 50 to 60 cm could be achieved on up to 6 h old samples.

The deformability of the annular gap mortar in its fresh state is of decisive importance for dimensioning the segmental lining. Therefore, oedometer tests were carried out in the WBI lab to determine the stiffness modulus

6 Ringspaltmörtel

Für den Ringspaltmörtel kommt beim Tunnelbau im östlichen Abschnitt der Red Line Tel Aviv ein zementbasierter Mörtel zur Anwendung [2]. Die verwendeten Mischungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Eigenschaften des Mörtels wurden im Labor im WBI-Center untersucht.

Der Frischmörtel hat eine Dichte von 2,1 g/cm³. Die Verarbeitbarkeit wurde durch Ausbreitversuche nachgewiesen, in denen Ausbreitmaße von ca. 50 bis 60 cm über einen Zeitraum bis ca. 6 h nach Herstellung der Mischung bestimmt werden konnten. Für die Bemessung der Tübbingauskleidung ist die Verformbarkeit des Ringspaltmörtels im frischen Zustand von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurden im Labor von WBI Ödometer-Versuche zur Bestimmung des Steifemoduls

Credit/Quelle: WBI GmbH

	Mix A	Modified Mix A
	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Cement CEM II 42.5 N/A-V	200	200
Sand (0–5 mm)	772.5	1004.25
Sand (0–2 mm)	772.5	540.75
Bentonite IMERYS	50	50
Water Reducer: Master Rheobuild	4	4
Retarder: Pozzolith 132	4	4
Water	275	275

Table 1 Annular gap grout, mix composition
Ringspaltmörtel, Mischungszusammensetzung

of the applied gap mortar (Fig. 11, [2]). The tested samples have a diameter of 23 cm and are 9.2 cm in height. Thus, the dimensions of these samples are sufficiently large, given the maximum grain size of the aggregates of 5 mm.

The freshly mixed grout samples were installed in the oedometer ring (Fig. 11, above right). A non-woven fabric and filterstones were installed respectively above and beneath the samples. Loading was imposed from above by a 50-t jack.

The test equipment enables to carry out “undrained” and “drained” tests. The results of the undrained tests are decisive for the tunnel sections in clay. For the sections in Kurkar, considered within the scope of this article (see Part 1, tunnel 4/2019), which possesses relatively high permeability, the results of the drained tests can be taken into account (free outflow of the excess water via non-woven fabric and filterstones), which correctly reflect the actual conditions.

Tests were undertaken at various temperatures and with samples of varying age. In addition, different mixes were considered. As anticipated, the stiffness modulus increases with increasing load, i.e. with increasing grouting pressure. Assuming a Poisson’s ratio of 0.35, a Young’s modulus of 5.6 MN/m² can be derived from the tests for a load range of 0.8 to 1.1 bar [2]. For a load range from 1.9 to 3.3 bar, the tests result in an Young’s modulus of > 9 MN/m².

The timely development of the measured settlements and quantities of drained water reveal a certain time dependence particularly for the smallest load level (consolidation). Also the grout density increases as a consequence of draining of the excess water. At the end of the test, a density of approx. 2.3 g/cm³ was determined (Fig. 11, below right).

Consequently, it has been shown on the basis of the tests that a Young’s modulus of 5 MN/m² can be achieved

des verwendeten Ringspaltmörtels durchgeführt (Bild 11, [2]). Die untersuchten Proben haben einen Durchmesser von 23 cm und eine Höhe von 9,2 cm. Die Probenabmessungen sind somit unter Berücksichtigung des Größtkorns des Mörtels von 5 mm ausreichend groß.

Die frisch angemischten Mörtelproben wurden in den Ödometerring eingebaut (Bild 11, rechts oben). Unterhalb und oberhalb der Proben wurden jeweils ein Vlies und Filtersteine angeordnet. Die Belastung erfolgt über eine 50 t-Prüfpresse von oben.

Die Versuchseinrichtung ermöglicht es, „undrained“ und „drained“ Versuche durchzuführen. Für die Tunnelstrecken im Ton sind die Ergebnisse von undrained Versuchen maßgebend; für die im Rahmen des vorliegenden Beitrags betrachteten Strecken im Kurkar (siehe auch Teil 1, tunnel 4/2019), der eine vergleichsweise hohe Durchlässigkeit besitzt, können die Ergebnisse von drained Versuchen herangezogen werden (freier Abfluss von Überschusswasser über Vlies und Filtersteine), die die tatsächlichen Verhältnisse im Versuch richtig nachbilden.

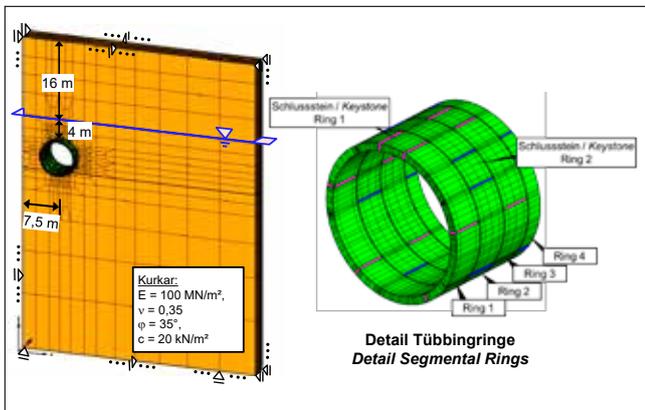


11 Oedometer Tests for Testing the deformability of the annular gap grout

Oedometerversuche zur Bestimmung der Verformbarkeit des Ringspaltmörtels

Es wurden Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen und an unterschiedlich alten Proben durchgeführt. Außerdem wurden verschiedene Mischungen berücksichtigt. Erwartungsgemäß nimmt der Steifemodul mit steigender Last, d. h. mit steigendem Mörtelverpressdruck, zu. Für eine Laststufe von 0,8 bis 1,1 bar kann nach [2] unter der Annahme einer Querdehnzahl von 0,35 ein E-Modul von 5,6 MN/m² aus den Versuchen abgeleitet werden. Für die Druckstufe von 1,9 bis 3,3 bar ergeben die Versuche einen E-Modul von etwas mehr als 9 MN/m².

Die zeitliche Entwicklung der gemessenen Setzungen und Wassermengen zeigt insbesondere bei der kleinsten Laststufe eine gewisse Zeitabhängigkeit (Konsolidation). Durch das Auspressen des Überschusswassers erhöht sich auch die Dichte des Mörtels. Nach dem Versuch wurde eine Dichte von ca. 2,3 g/cm³ ermittelt (Bild 11, rechts unten).



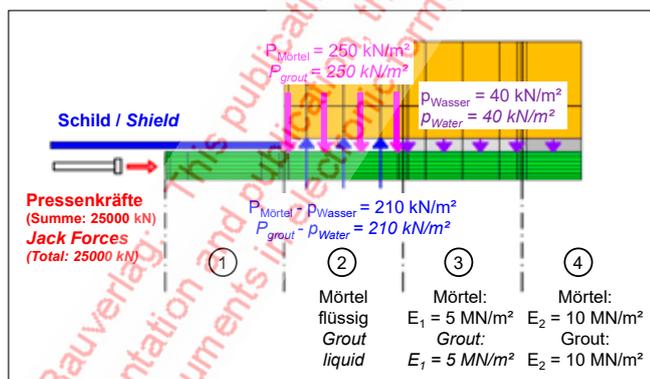
Credit/Quelle: WBI GmbH

12 3D-FE analysis for evaluating the influence of the gap grout's deformability on the loading of the segmental lining, FE-Mesh
3D-FE-Berechnung zur Ermittlung des Einfluss der Verformbarkeit des Ringspaltmörtels auf die Beanspruchung der Tübbinge, FE-Netz

with the cement-based annular gap grout, as long as the effective grouting pressure amounts to at least 1 bar and the subsoil has a sufficiently high permeability to enable the mortar to be drained, as is the case in the Kurkar. The grouting pressure must be maintained over a certain period to allow the mortar to consolidate.

3D-FE-analyses with WBI's in-house FEST03 programme system were also used for the project to dimension the segments in their installed state. For this purpose, a 3D-FE mesh was used, in which a total of four segmental rings are simulated (Fig. 12). Both the longitudinal as well as the circumferential joints are discretely simulated in the mesh. For the cases dealt with in this article, it was assumed that the tunnel is located completely in the Kurkar layers (Fig. 12, on the left).

The four segmental rings considered in the analyses are subjected to their own weight and the loads shown in Fig. 13. The first ring is installed within the shield and held in place by the thrust cylinders (Fig. 13, ring ①).



Credit/Quelle: WBI GmbH

13 Load assumptions and adopted deformability of the gap grout
Lastannahmen und angenommene Verformbarkeit des Ringspaltmörtels

Durch die Versuche konnte somit gezeigt werden, dass mit dem verwendeten zementbasierten Ringspaltmörtel ein E-Modul des frischen Mörtels von 5 MN/m^2 erreicht werden kann, wenn der effektive Mörtelverpressdruck mindestens 1 bar beträgt und wenn der Baugrund eine ausreichend hohe Durchlässigkeit besitzt, um ein Dränieren des Mörtels zu ermöglichen, wie das im Kurkar der Fall ist. Der Mörtelverpressdruck muss über einen gewissen Zeitraum aufrechterhalten werden, um die Konsolidation des Mörtels zu ermöglichen.

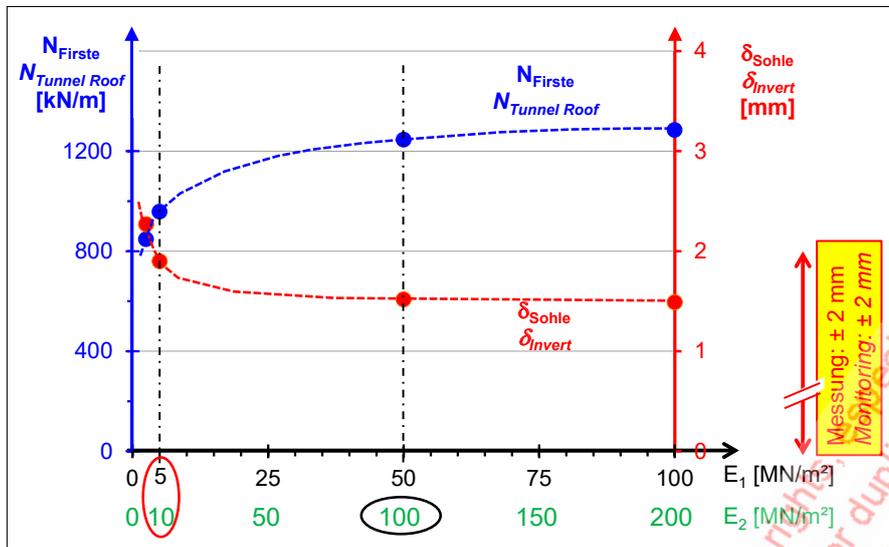
Für die Bemessung der Tübbinge im Einbauzustand wurden für das Projekt ebenfalls 3D-FE-Berechnungen mit dem WBI-eigenen Programmsystem FEST03 durchgeführt. Dazu wurde ein 3D-FE-Netz verwendet, in dem insgesamt vier Tübbingringe nachgebildet werden (Bild 12). Sowohl die Längs- als auch die Ringfugen werden diskret simuliert. Für die im Rahmen dieser Veröffentlichung betrachteten Fälle wurde angenommen, dass der Tunnel vollständig in den Schichten des Kurkar zu liegen kommt (Bild 12, links).

Die vier betrachteten Tübbingringe werden durch ihr Eigengewicht und die in Bild 13 skizzierten Lasten beansprucht. Der erste Ring wird im Schutz des Schildmantels errichtet und durch die Vortriebspresen gehalten (Bild 13, Ring ①). Im Bereich des Rings ② erfolgt die Ringspaltverpressung. In den hier vorgestellten Berechnungen wird von einem Mörtelverpressdruck von 2,5 bar ausgegangen, der den Tübbingring belastet. Gleichzeitig wird die Ausbruchskontur durch die Differenz zwischen dem Mörtelverpressdruck und dem wirkenden Wasserdruck beansprucht.

Für den Bereich des Rings ③ wird angenommen, dass der Mörtel angesteift ist. Auf der Grundlage der Ergebnisse der zuvor beschriebenen Laborversuche wird der E-Modul des Mörtels hier mit 5 MN/m^2 angenommen. Diese Annahme liegt vor dem Hintergrund des gewählten Verpressdrucks von 2,5 bar geringfügig auf der sicheren Seite. Im Bereich des Rings ④ wird der E-Modul aufgrund des höheren Alters des Mörtels mit 10 MN/m^2 etwas höher angenommen.

Mit den getroffenen Annahmen ($E_{\text{M}} = 5 \text{ MN/m}^2$ und $E_{\text{G}} = 10 \text{ MN/m}^2$) ergeben die Berechnungen für die Tübbingröhre eine geringfügige Hebung von ca. 2 mm (Bild 14). Die errechneten Verschiebungen stimmen gut mit den Messergebnissen überein ($\pm 2 \text{ mm}$). Die Normalkraft in Höhe der Firste beträgt für den betrachteten Fall maximal ca. 1000 kN/m.

Die Ergebnisse können durch die angenommene Vortriebspresenkraft, den Mörtelverpressdruck und die Steifigkeit des Ringspaltmörtels beeinflusst werden. Bei sonst gleichen Annahmen nehmen die Normalkräfte in der Firste mit steigendem E-Modul des Ringspaltmörtels zu, während die Sohlhebungen mit größer werdendem E-Modul geringer werden. Eine Erhöhung des E-Moduls des Ringspaltmörtels über den des umgebenden Baugrunds hinaus ($E = 100 \text{ MN/m}^2$) führt erwartungsgemäß zu keiner weiteren Veränderung des Ergebnisses [2]. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass



14 Influence of the Young's modulus of the gap grout on the normal thrust and the displacements of the segmental ring
Einfluss des E-Moduls des Mörtels auf die Normalkraft und die Verschiebung des Tübbingrings

Annual gap grouting takes place at ring ②. In the calculations that are presented here, a grouting pressure of 2.5 bar is assumed, which also acts on the segmental ring. At the same time, the excavated contour is loaded by the difference between the grouting pressure and the effective water pressure.

It is assumed that the mortar has stiffened in the area of ring ③. Based on the results of the lab tests that were previously described, the mortar's Young's modulus is assumed to be 5 MN/m² here. This assumption in view of the selected grouting pressure of 2.5 bar, this assumption is slightly on the safe side. At ring ④ the Young's modulus of the grout is assumed to be somewhat higher at 10 MN/m² since the mortar is older.

With these assumptions ($E_{\text{soil}} = 5 \text{ MN/m}^2$ and $E_{\text{grout}} = 10 \text{ MN/m}^2$) the calculations for the segmental tube result in a slight heave of approx. 2 mm (Fig. 14). The calculated displacements are in good agreement with the results of the measurements ($\pm 2 \text{ mm}$). The normal thrust at roof level amounts to a maximum of roughly 1000 kN/m for the case in question.

The results can be influenced by the applied thrust forces, the grouting pressure and the stiffness of the annular gap grout. Under the same assumptions, the normal forces in the roof increase as the Young's modulus of the annular gap mortar increases, whereas the heave in the floor decreases as the Young's modulus increases. An increase of the annular gap grout's Young's modulus beyond that of the surrounding subsoil ($E = 100 \text{ MN/m}^2$) as expected does not alter the results any further [2]. The results of the calculations indicate that the Young's moduli of the fresh mortar derived from the oedometer tests are sufficient.



Credit/Quelle: JV Danya Cebus/CCECC

15 TBM S1026 before launching from Depot portal (on the left) and undercrossing of the railway line west of Depot portal, plan (on the right)
 TBM S1026 vor dem Beginn des Vortriebs am Portal Depot (links) und Bahnunterführung westlich des Depot Portals, Lageplan (rechts)

For dimensioning the segmental lining in its final state or for dimensioning the segments of the first tube when the second machine is passing by (see tunnel 4/2019, Part 1, Section 5), the deformability of the hardened annular gap mortar is important. This was determined by means of uniaxial compression tests including measuring the strains. The tests yielded Young's moduli of 8000 to 10 000 MN/m² and thus values, which are far in excess of those of the surrounding soil [2]. In order to prevent uplifting of the segmental ring, according to [6] a shear strength of 2 kN/m² is required. This parameter is also fulfilled by the applied mortar.

7 Tunnel Drives in Clay

As explained, excavation activities started at the Depot portal in the northeast. Due to the very limited space available in the starting shaft, the two TBMs could only be assembled and start heading works one after the other. Both drives underpass the existing Israeli Railways route after only a few tens of metres. Tunnelling work commenced on the northern tube (axis 6), as the route between the portal wall and the area of influence of the tracks is somewhat longer here than for the southern tube (Fig. 15). As a result, a slightly longer section was available to collect experience with the new TBMs in the prevailing subsoil. Furthermore, according to the results of the stability analyses, this tube had to be driven prior to the tunnel tube of axis 5 located above, in the area of Chamber 1/5/2/6 (Fig. 16).

die aus den Ödometerversuchen abgeleiteten E-Moduln des frischen Mörtels ausreichend sind.

Für die Bemessung der Tübbingröhre im Endzustand bzw. für die Bemessung der Tübbingröhre während der Vorbeifahrt mit der zweiten Maschine (siehe tunnel 4/19, Teil 1, Abschnitt 5) ist die Verformbarkeit des erhärteten Ringspaltmörtels wichtig. Diese wurde anhand von einaxialen Druckversuchen mit Messung der Dehnungen der Probe bestimmt. Es ergaben sich E-Moduln von 8000 bis 10 000 MN/m² und somit Werte, die deutlich größer sind als die des umgebenden Bodens [2].

Um ein Aufschwimmen der Tübbingröhre zu vermeiden, ist gemäß [6] eine Scherfestigkeit von 2 kN/m² erforderlich. Diese Vorgabe wird vom verwendeten Mörtel ebenfalls erfüllt.

7 Vortriebe im Ton

Wie erläutert, haben die Vortriebsarbeiten am Depot Portal im Nordosten begonnen. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Startschacht konnten die beiden Vortriebsmaschinen nur nacheinander aufgebaut werden und den Vortrieb beginnen. Beide Vortriebe unterqueren nach wenigen Zehnermetern die bestehende Strecke der Israelischen Eisenbahnen. Die Vortriebsarbeiten wurden mit der nördlichen Röhre (Achse 6) begonnen, da die Strecke zwischen der Portalwand und dem Einflussbereich der Gleise hier etwas länger ist als für die südliche Röhre (Bild 15). Dadurch stand eine etwas längere Strecke zum Sammeln von Erfahrungen mit den neuen Vortriebsmaschinen im anstehenden Baugrund zur Verfügung. Außerdem musste diese Röhre nach den Ergebnissen der statischen Berechnungen im Bereich der Chamber 1/5/2/6 vor der

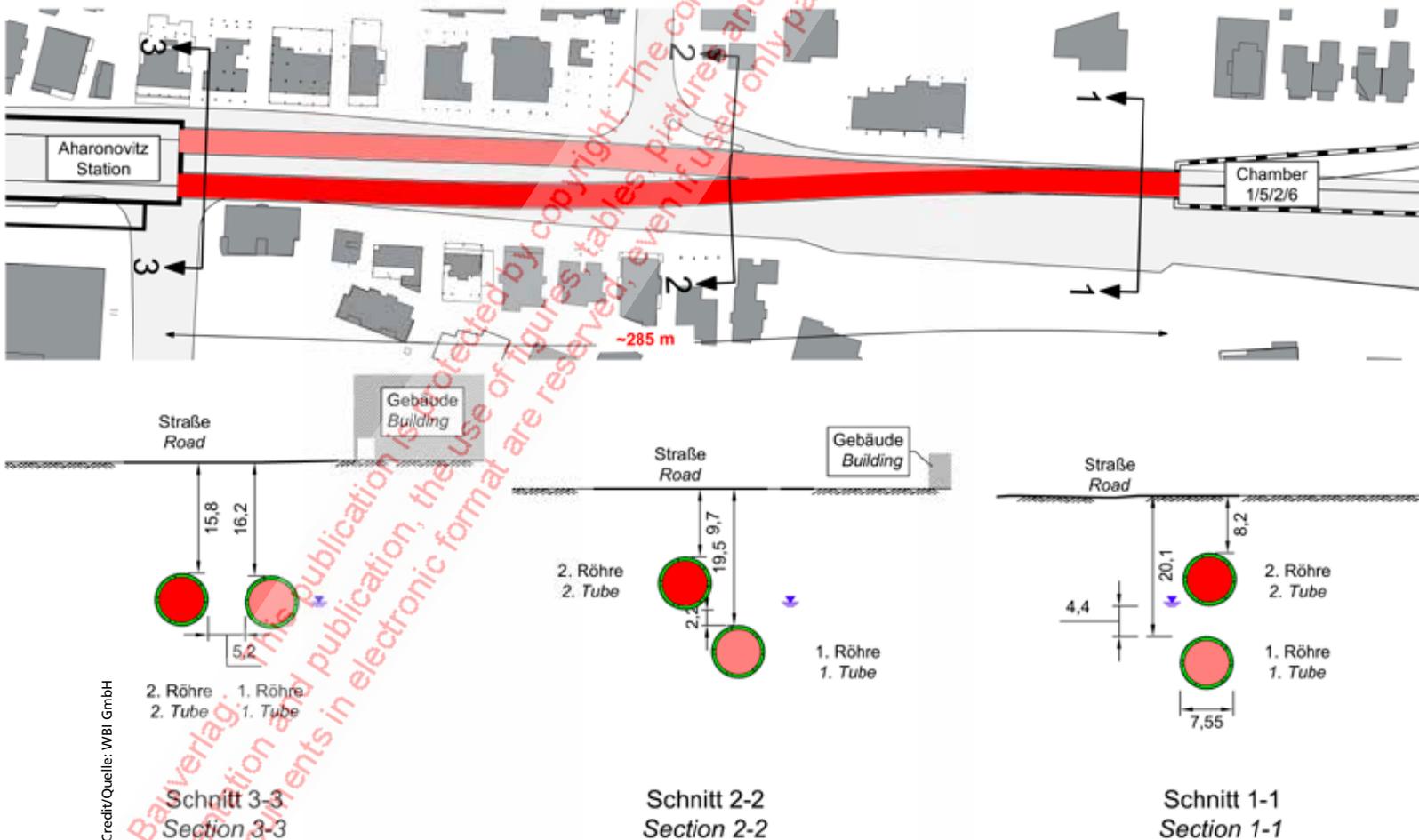
A so-called sealing pot was constructed to enable the TBMs to enter the ground. This comprises a diaphragm wall box. The diaphragm walls seal off the sand layer located beneath the tunnel floor at the sides (Fig. 10). The water pressure in the sand layer was subsequently lowered by wells set up within the sealing pot before driving started, so that the TBM could move into "dry" subsoil. Once the first two segmental rings had been installed in the subsoil dewatering was stopped and the TBM was able to exit the sealing pot.

Undertunnelling the railway line took place at a glancing intersection in both tubes. On the basis of extensive 3D-FE analyses, in which the support of the working face and the steering gap as well as the effect of grouting the annular gap were taken into account, the following guidelines for the tunnel drives were elaborated:

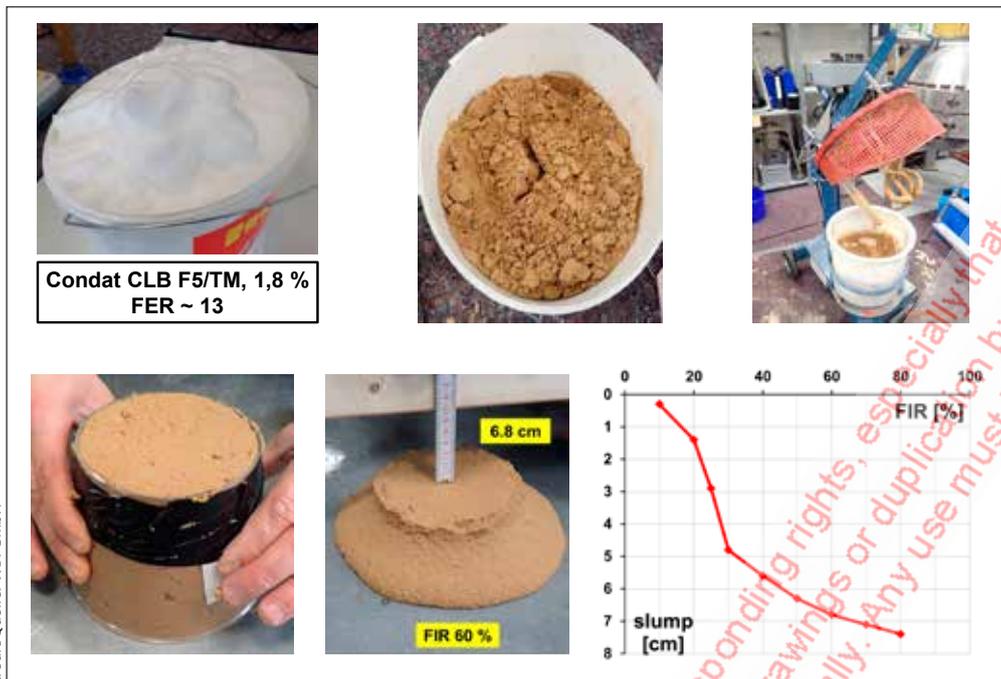
dort oberhalb liegenden Tunnelröhre der Achse 5 aufgeföhren werden (Bild 16).

Für das Einföhren der Tunnelvortriebsmaschinen wurde ein sogenannter Dichttopf (Sealing Pot) gebaut. Dieser besteht aus einem Schlitzwandkasten. Die Schlitzwände dichten die unterhalb der Tunnelsohle anstehende Sandschicht zu den Seiten hin ab (Bild 10). Der Wasserdruck in der Sandschicht wurde schließlich vor Vortriebsbeginn über innerhalb des Dichttopfes angeordnete Brunnen abgesenkt, so dass die TVM in einen „trockenen“ Baugrund einföhren konnte. Nach dem Einbau der ersten zwei Tübbingringe im Baugrund wurde die Wasserhaltung abgestellt und die TVM konnte den Dichttopf verlassen.

Die Unterföhren der Eisenbahnstrecke erfolgte in beiden Röhren in einem schleifenden Schnitt. Auf der Grundlage von umfangreichen 3D-FE-Berechnungen in denen die Stützung der Ortsbrust und des Steuerspalts sowie die Wirkung der



16 Section Chamber 1/5/2/6 – Aharonovitz Station, plan and cross-sections
Abschnitt Chamber 1/5/2/6 – Station Aharonovitz, Lageplan und Querschnitte



17 Laboratory Tests for conditioning of Kurkar
Laborversuche zur Konditionierung von Kurkar

Credit/Quelle: WBI GmbH

- Support pressure: 2.0 to 2.5 bar
- Introducing bentonite suspension in the steering gap to support the excavation contour
- Installing the annular gap grout with grout pressures of 3.5 to 4.0 bar

Based on these values, max. track settlements of 6 mm were predicted in the analyses. Taking these parameters into account, both drives underneath the railway were completed successfully in spite of the shallow overburden of roughly 8–11 m. The track settlements continuously monitored by means of automatic measuring systems reached a maximum of 4–5 mm and thus were in good agreement with the predictions.

Once all permits had been obtained for further excavation, it was possible to complete heading to Em Hamoshavot Station with an average rate of advance of roughly 10 m/d for the first TBM and 15 m/d for the second one. The maximum rate of advance achieved amounted to 36 m/d. The machines arrived at the station driving into a closed steel structure filled with soil and water.

8 Tunnel Drives in Kurkar

Between Chamber 5/8 and Ben Gurion Station the tunnel tubes are mainly located in Kurkar and non-cohesive soils. For these sections extensive conditioning measures were essential (addition of polymers and tensides as well as fines at the cutterhead and in the excavation chamber). For the sections located above the groundwater in particular, driving activities were in part very difficult in spite of the conditioning measures.

Ringspaltverpressung Eingang gefunden haben, wurden die folgenden Vorgaben für die Tunnelvortriebe gemacht:

- Stützdruck: 2,0 bis 2,5 bar
- Einbringen von Bentonitsuspension in den Steuerspalt zur Stützung der Ausbruchskontur
- Einbringen des Ringspaltmörtels mit Drücken von 3,5 bis 4,0 bar

Mit diesen Werten wurden Senkungen der Gleise von max. 6 mm in den Berechnungen prognostiziert. Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben konnten beide Vortriebe unter der Eisenbahn trotz der geringen Überdeckung von ca. 8–11 m erfolgreich durchgeführt werden. Die über automatische Messsysteme kontinuierlich gemessenen Senkungen der Gleise betragen maximal ca. 4–5 mm und entsprachen somit der Prognose.

Nachdem für den weiteren Vortrieb alle Genehmigungen eingeholt worden waren, konnten die Arbeiten bis zur Station Em Hamoshavot mit einer mittleren Vortriebsgeschwindigkeit von ca. 10 m/d für die erste TBM und 15 m/d für die zweite TBM abgeschlossen werden. Maximal wurde eine Vortriebsleistung von 36 m/d erreicht. In der Station sind die Maschinen in eine geschlossene, mit Boden und Wasser gefüllte Stahlkonstruktion eingefahren.

8 Vortriebe im Kurkar

Zwischen der Chamber 5/8 und der Station Ben Gurion liegen die Tunnelröhren überwiegend im Kurkar und rolligen Böden. Für diese Abschnitte waren umfangreiche Maßnahmen zur Konditionierung erforderlich (Zugabe von Polymeren und Tensiden sowie Feinteilen am Bohrkopf bzw. in die Abbaukammer). Insbesondere in den oberhalb des Grundwassers



18 Conditioned Kurkar on the belt conveyor
Konditionierte Kurkar auf dem Förderband

Preparatory tests were carried out in the lab to define a suitable conditioning agent and the correct dosage (Fig. 17). The tests revealed that the product CLB F5/TM from the Condat company was the most suitable among the agents that were tested in the lab of WBI.

The flow consistency was determined on 1 l large samples for varyingly large amounts of foam (FIR). The addition of foam took place in the lab mixer. The flow consistency increases as foam is added. In visual terms, the best result in the lab was achieved with a FIR of 60 % (Fig. 17). Based on these orientating lab tests a suitable combination of the foam parameters was found in situ within a short time (Fig. 18).

In the area east and west of the Chamber 1/5/2/6 junction structure, the lower tube was driven prior to the upper one. Based on extensive FE-analyses, it was shown that in spite of the narrow spacing of roughly 4 m between the roof of the lower tube and the floor of the upper one, no additional stabilisation measures were required, providing the driving sequence and the guidelines for the support pressure and the grouting pressure were observed.

In the remaining tunnel sections up to Ben Gurion Station, the support pressure and the mortar grouting pressure had also to be selected at higher levels as would have been necessary for reasons of stability, in order to limit the settlements on the ground surface and avoid damage to the surrounding buildings.

Average rates of advance of about 13 m/d and maximum rates of 33 m/d were achieved between the Aharonovitz and Ben Gurion Stations. The second TBM reached the

liegenden Abschnitten waren die Vortriebsarbeiten trotz der Konditionierungsmaßnahmen zum Teil sehr schwierig.

Als Grundlage für die Wahl eines geeigneten Konditionierungsmittels und die richtige Dosierung wurden im Labor vorbereitende Versuche durchgeführt (Bild 17). Die Versuche haben gezeigt, dass das Produkt CLB F5/TM der Firma Condat von den untersuchten Mitteln das geeignetste war.

Das Absetzmaß wurde an 1 l großen Proben für unterschiedlich große Schaumzugaben (FIR) bestimmt. Die Schaumzugabe erfolgte im Labormischer. Das Absetzmaß nimmt mit zunehmender Schaumzugabe zu. Visuell das beste Ergebnis konnte im Labor mit einem FIR von 60 % erzielt werden (Bild 17). Auf der Grundlage der orientierenden Laborversuche konnten in-situ in kurzer Zeit eine geeignete Kombination der Schaumparameter gefunden werden (Bild 18).

Im Bereich östlich und westlich des Verzweigungsbauwerks Chamber 1/5/2/6 wurde die untere Röhre vor der oberen Röhre aufgeföhren. Durch umfangreiche FE-Berechnungen konnte gezeigt werden, dass trotz des kleinen Abstands zwischen der Firste der unteren und der Sohle der oberen Röhre von ca. 4 m bei Beachtung der Vortriebsreihenfolge und der Vorgaben hinsichtlich des Stützdrucks und des Mörtelverpressdrucks keine zusätzlichen stabilisierenden Maßnahmen erforderlich waren.

Der Stützdruck und der Mörtelverpressdruck mussten auch in den übrigen Streckenabschnitten bis zur Station Ben Gurion zur Begrenzung der Senkungen an der Geländeoberfläche und zur Vermeidung von Schäden an der umliegenden Bebauung höher gewählt werden, als es aus Gründen der Standicherheit erforderlich gewesen wäre.

Zwischen den Stationen Aharonovitz und Ben Gurion wurden mittlere Vortriebsleistungen von ca. 13 m/d und maximale



Credit/Quelle: WBI GmbH

19 Photo from cross-passage CP24 west of Aharonovitz station
Foto aus dem Querschlag 24 westlich der Station Aharonovitz

station in January 2019. The target shaft was flooded temporarily to allow both machines to enter.

9 Summary

Two EPB tunnel boring machines made by Herrenknecht drove 2 x 2.655 km of tunnel for the eastern part of the Tel Aviv Red Line. Tunneling was carried out by a JV involving the Israeli construction company Danya Cebus and the Chinese contractor CCECC. WBI carried out the detailed design and accompanied construction activities on behalf of the joint venture.

The drives were undertaken successfully both in clay and mixed-grained soils as well as in non-cohesive soils. Maximum rates of advance of 36 m/d were achieved.

Work on the cross-passages has also been completed in the meantime. The groundwater level in the silty-clayey soils and in the layer of sand located underneath the tunnel floor was lowered by means of vacuum deep wells to build the three cross-passages between the Depot portal and Em Hamoshavot Station. Thanks to these measures, it was possible to drive the cross-passages without any additional subsoil stabilisation. The opening of the segments was supported by a steel frame that was installed step-by-step. A corresponding support for opening was also applied for the five cross-passages between Aharonovitz and Ben Gurion Stations (Fig. 19). However, here the subsoil was treated by jet grouting prior to excavating the main tubes. In addition, prior to opening the segments, locally cement grouting was carried out from

Vortriebsleistungen von 33 m/d erreicht. Die zweite TBM hat im Januar 2019 die Station erreicht. Der Zielschacht wurde für den Einfahrtvorgang beider Maschinen temporär geflutet.

9 Zusammenfassung

Für den östlichen Teil der Red Line in Tel Aviv wurden 2 x 2,655 km Tunnel mit zwei EPB-Tunnelbohrmaschinen der Firma Herrenknecht aufgeföhren. Die Ausführung erfolgte durch ein Konsortium der Israelischen Baufirma Danya Cebus und der chinesischen Baufirma CCECC. WBI hat im Auftrag des Konsortiums die Ausführungsplanung und die Betreuung der Bauarbeiten übernommen.

Die Vortriebe konnten sowohl im Ton und gemischtkörnigen Böden als auch in rolligen Böden erfolgreich durchgeführt werden. Es wurden maximale Vortriebsleistungen von 36 m/d erzielt.

Auch die Arbeiten an den Querschlügen wurden in der Zwischenzeit abgeschlossen. Für den Bau der drei Querschlügen zwischen dem Depot Portal und der Station Em Hamoshavot wurde der Grundwasserspiegel in den schluffig-tonigen Böden und in der unterhalb der Tunnelsohle liegenden Sandschicht über Vakuumtiefbrunnen abgesenkt. Durch diese Maßnahmen konnten die Querschlügen ohne eine zusätzliche Baugrundstabilisierung aufgeföhren werden. Die Öffnung der Tübbinge wurde mit einem schrittweise eingebauten Rahmen aus Stahl gesichert. Eine entsprechende Sicherung der Öffnung wurde auch für die fünf Querschlügen zwischen den Stationen Aharonovitz und Ben Gurion ausgeführt (**Bild 19**). Hier wurde der Baugrund jedoch vor dem Vortrieb der Haupttröhren

inside the tunnel. A report on designing and constructing the cross-passages is to be found elsewhere.

We should like to express our thanks to our clients, the Danya Cebus Ltd. (Israel) and CCECC (China) companies as well as the representatives of the owner of the project (Spivak Engineering) and the Herrenknecht company for their trusting and good cooperation.

durch das Düsenstrahlverfahren verfestigt. Zusätzlich wurden vor dem Öffnen der Tübbinge aus dem Tunnel heraus örtlich Zementinjektionen ausgeführt. Über die Planung und den Bau der Querschläge wird an anderer Stelle berichtet werden. Unser Dank gilt unseren Auftraggebern, den Firmen Danya Cebus Ltd. (Israel) und CCECC (China) sowie den Vertretern des Bauherrn (Spivak Engineering) und der Firma Herrenknecht für die vertrauensvolle und gute Zusammenarbeit.

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).
- [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).
- [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.

Vössing 1/4 S

Flexco 1/4 S