

Entwurf der Tunnel für die Red Line der Stadtbahn von Tel Aviv, Israel

**Dr.-Ing. Martin Wittke, Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke
Shmuel Ashkenazi
Jiao Gang**

Zusammenfassung

Die Red Line der U-Bahn Tel Aviv verbindet die Stadt Jaffa im Süden mit den Städten Ramat Gan und Bnei Brak im Norden der Metropole. 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 ein Konsortium aus dem israelischen Unternehmen Danya Cebus und der chinesischen Baufirma CCECC. Die WBI GmbH wurde, nachdem bereits eine Beratung während der Angebotsphase durchgeführt wurde, vom Konsortium mit der Ausführungsplanung für die Tunnel beauftragt. Diese werden mit zwei EPB-Maschinen der Firma Herrenknecht und konventionell in Spritzbetonbauweise aufgeföhren.

Die Länge des Streckenabschnitts beträgt insgesamt ca. 6,5 km.

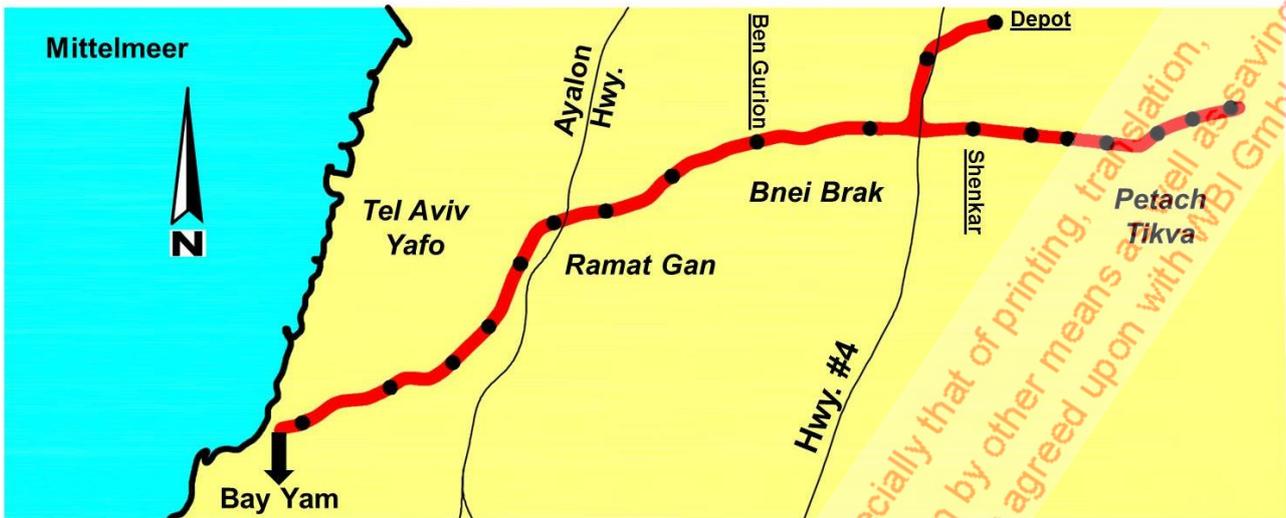
Der Baugrund besteht überwiegend aus Kurkar. Dabei handelt es sich um einen Kiessand, der durch kalkige Bindemittel unterschiedlich verfestigt ist. Abschnittsweise stehen auch Ton und gemischtkörnige Böden an. Der Grundwasserspiegel steht etwas oberhalb des Meerwasserspiegels an.

Besondere Herausforderungen für den Entwurf und den Bau stellen die Unterföhren von Verkehrswegen, von setzungsempfindlichen Hoch- und Brückenbauwerken sowie Sparten unterschiedlicher Art dar.

1. Das Projekt

Die Red Line der im Bau befindlichen zweigleisigen Stadtbahn von Tel Aviv 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 (Bild 1). Entlang der Schnellstraße #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.

Mit dem Bau des östlichen Abschnitts der Red Line, vom Depot bis zur Station Ben Gurion im Westen und zum Portal Shenkar im Osten wurde ein Konsortium aus den Firmen Danya Cebus (Israel) und CCECC (China) beauftragt (Bild 2). WBI erstellt im Auftrag dieser Firmen die Ausführungsplanung für die ca. 6,5 km langen Tunnel dieses Streckenabschnitts. Davon werden 2 x 3,1 km maschinell und 0,37 km konventionell aufgeföhren.



Σ ~ 24 km Strecke, davon ~11 km Tunnel (x2)

Bild 1: Red Line Tel Aviv, Übersicht

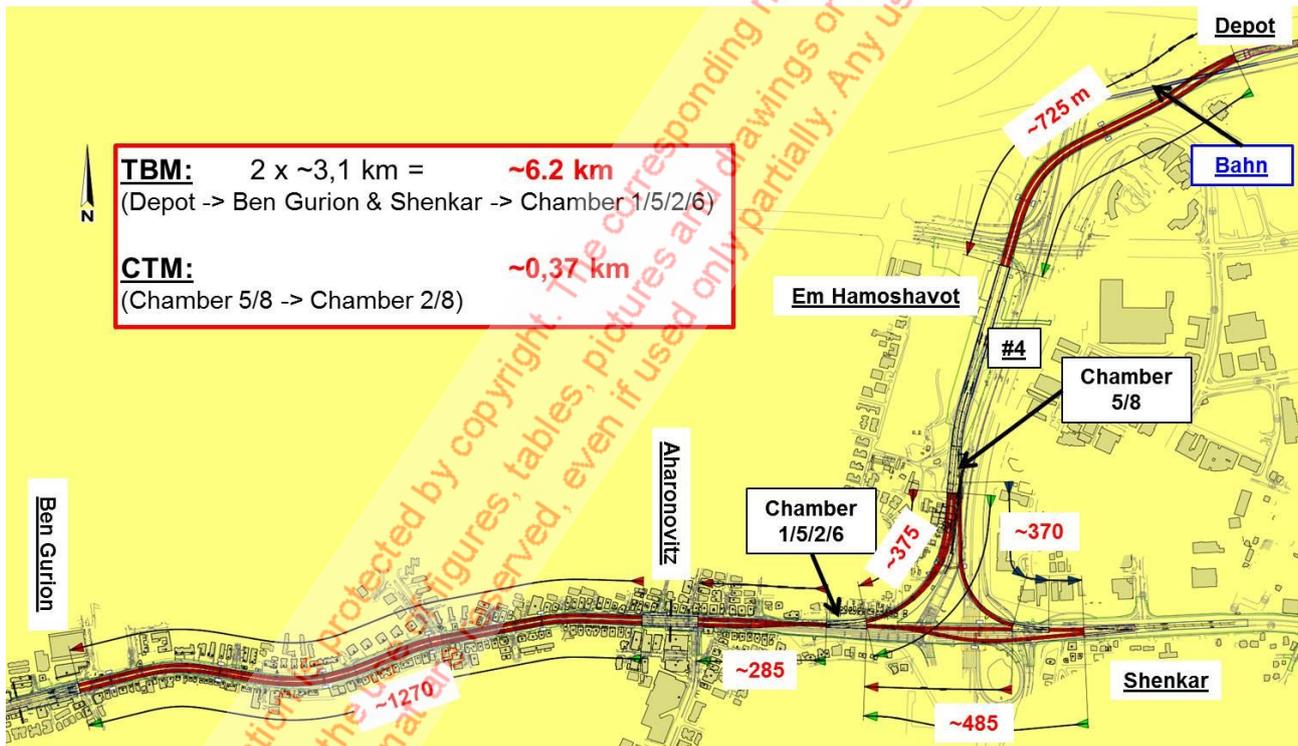


Bild 2: Red Line Eastern Section, Lageplan

Die Tunnel haben einen Kreisquerschnitt mit einem Innendurchmesser von 6,5 m (Bild 3). Die Tübbinge der maschinell hergestellten Tunnelröhren sind 35 cm dick und werden aus Stahlbeton B60 hergestellt. Der Ausbruchsdurchmesser der TBM beträgt 7,55 m. Daraus ergibt sich ein Ringspalt von 17,5 cm Dicke. Die Außenschale des in Spritzbetonbauweise hergestellten Tunnels wird mit einer Betonqualität B30 erstellt und ist 25 cm dick. Die Innenschale wird in einer Dicke von 40 cm in Beton B40 ausgeführt werden. Zwischen der Innen- und Außenschale wird eine KDB angeordnet (Bild 3).

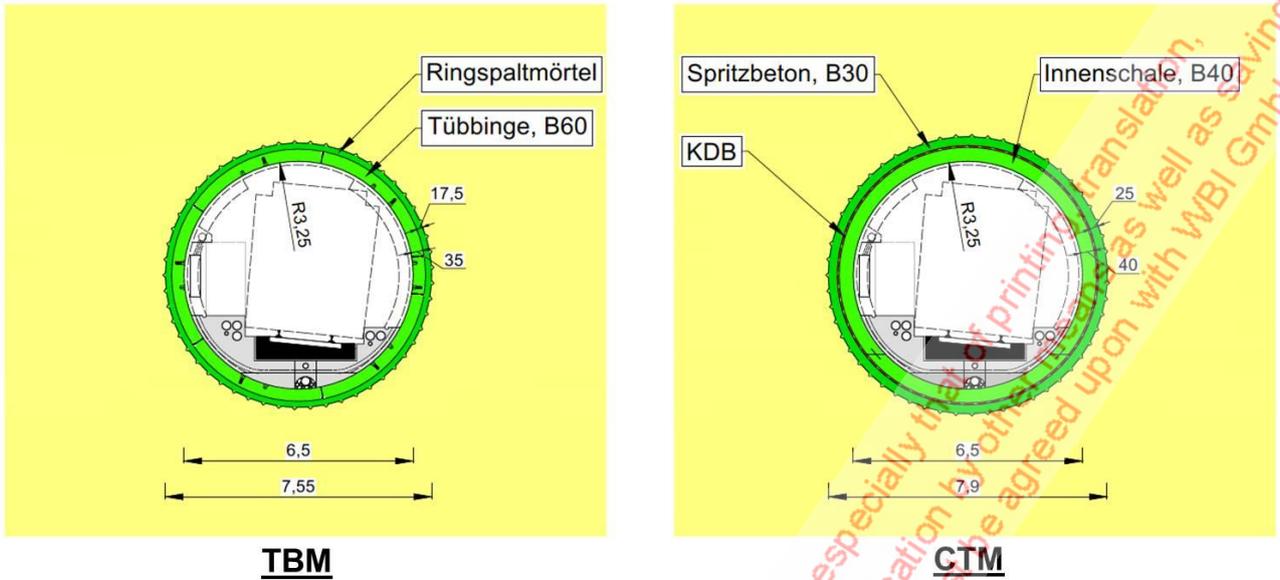


Bild 3: Regelquerschnitte

2. Untergrundverhältnisse

Der Streckenabschnitt vom Depot im Nordosten bis zur Station Em Hamoshavot kommt in einem ausgeprägt plastischen Ton und in gemischtkörnigen Böden zu liegen (Bilder 2 und 4). Unterhalb der Tunnelröhren steht hier eine durchgehende Sandschicht an. Der Grundwasserspiegel liegt in diesem Tunnelabschnitt in Höhe und oberhalb der Tunnelfirste (Bild 4). In diesem Abschnitt unterfährt der Tunnel mit geringer Überdeckung eine Bahnstrecke und die o. g. Schnellstraße sowie verschiedene Sparten.

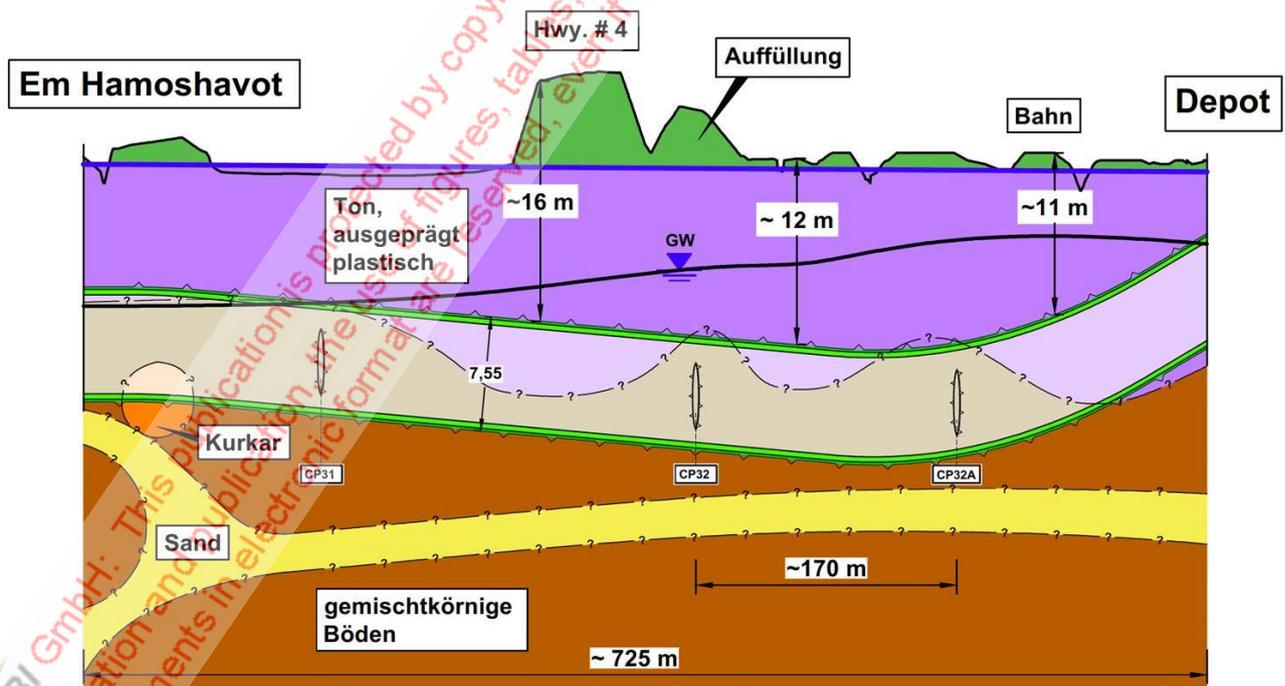


Bild 4: Abschnitt Depot - Em Hamoshavot, Längsschnitt

Die Plastizitätsdiagramme vermitteln einen Eindruck von den Eigenschaften der bindigen Böden (Bilder 5 und 6). Eine Kornverteilung des Sandes zeigt Bild 7. Es handelt sich danach um einen schwach schluffigen, schwach kiesigen Fein- bis Mittelsand.

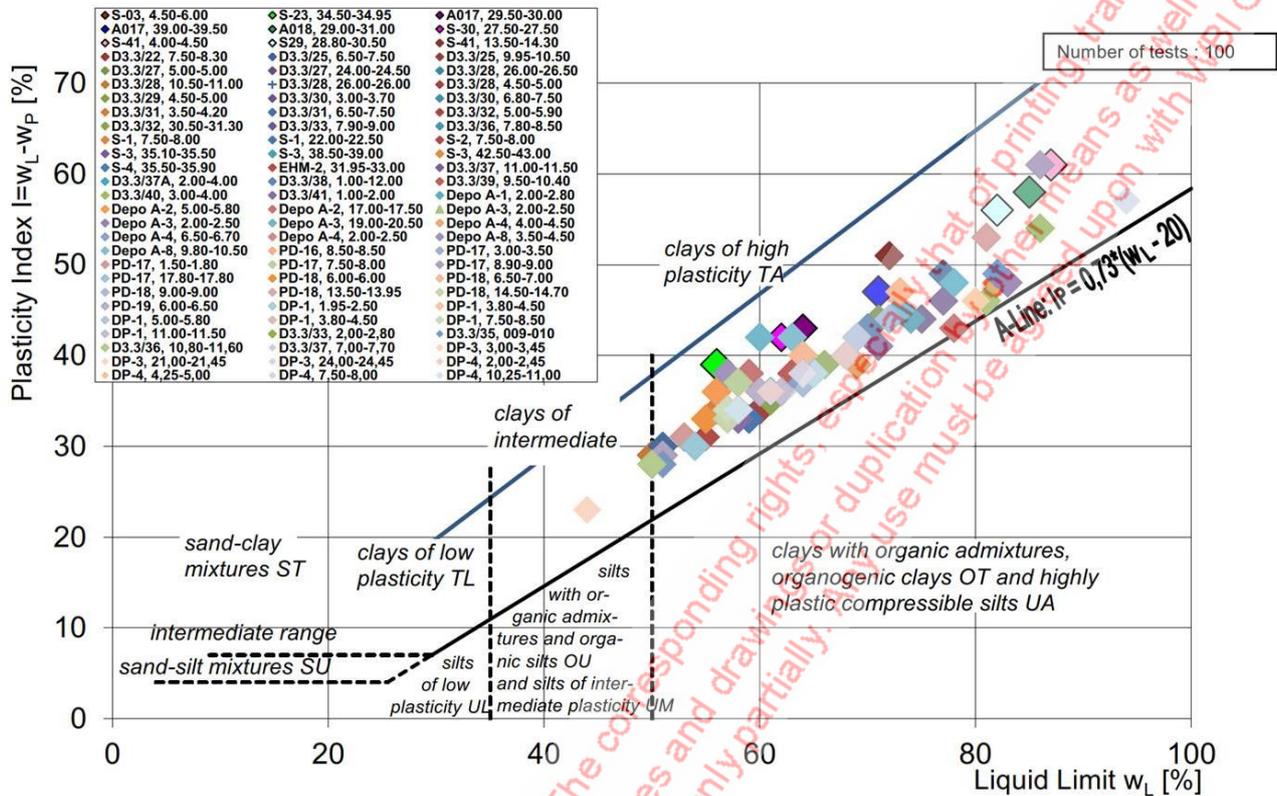


Bild 5: Ton, ausgeprägt plastisch, Plastizitätsdiagramm

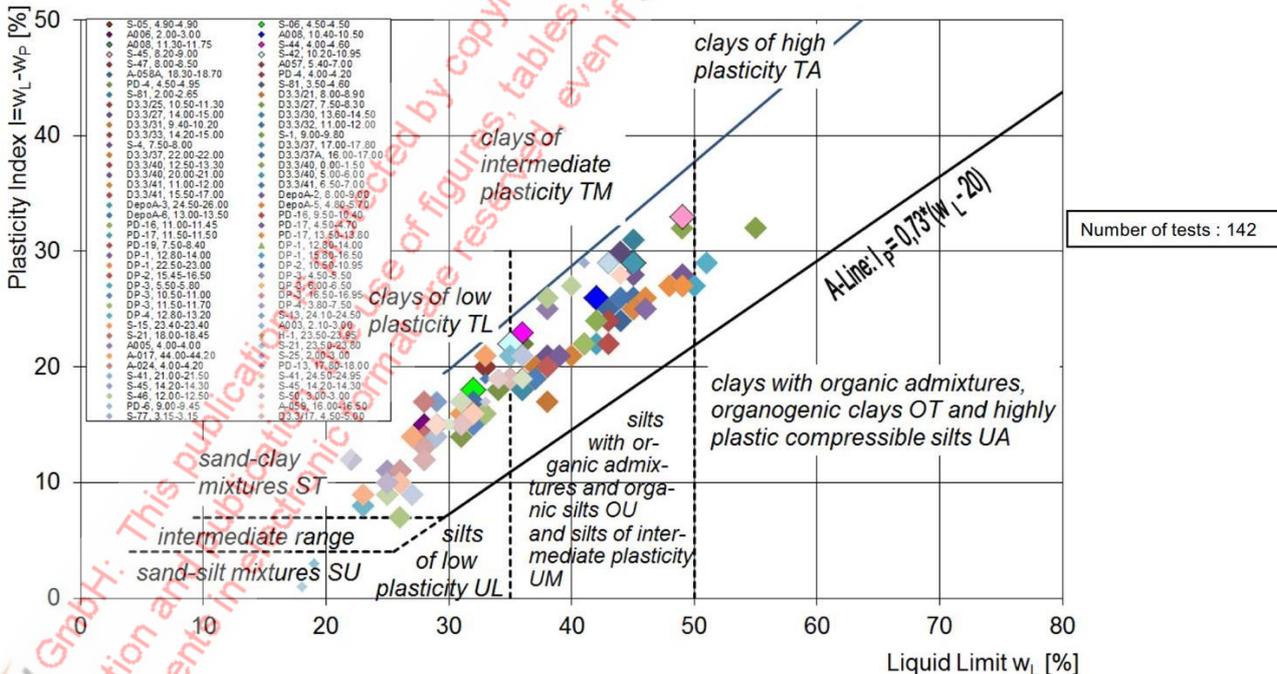


Bild 6: Gemischtkörnige Böden, Plastizitätsdiagramm

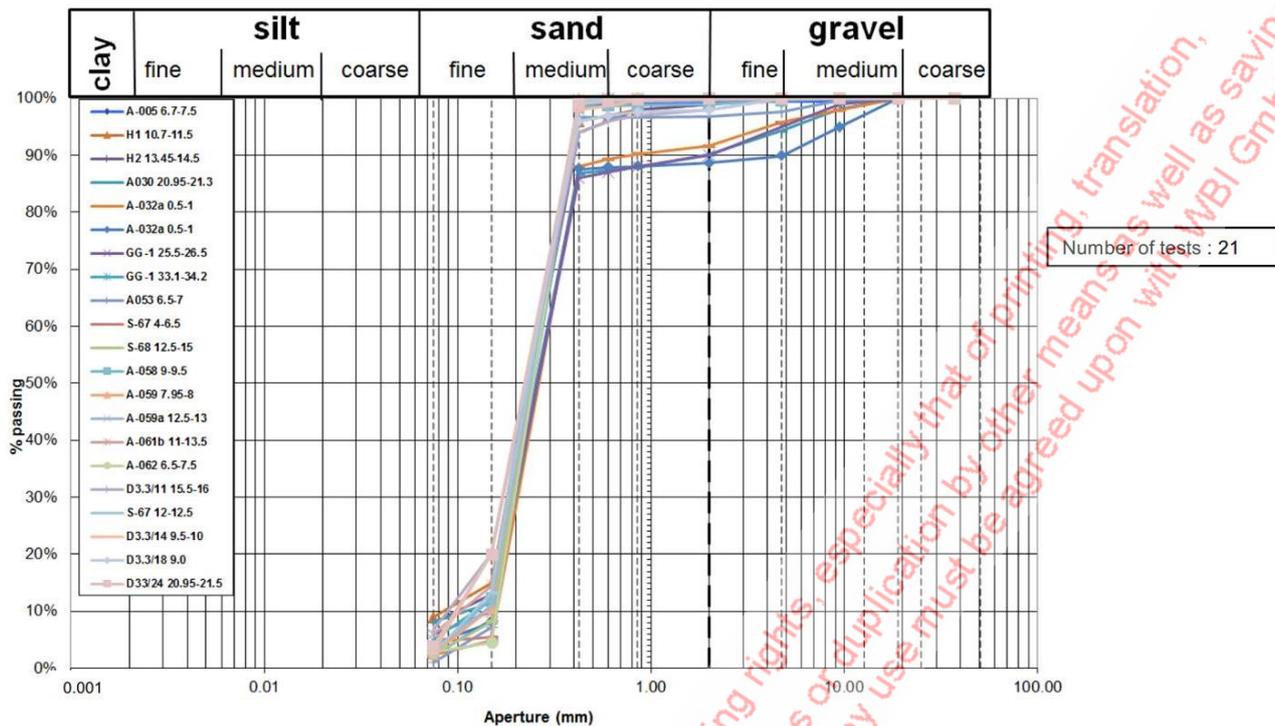


Bild 7: Sand, Kornverteilung

Der ca. 1,3 km lange Abschnitt zwischen den Stationen Aharonovitz und Ben Gurion kommt im Kurkar zu liegen (Bilder 2 und 8). Das ist ein in weiten Teilen der Stadt Tel Aviv anstehendes Sediment, das hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung als Kies-Sand angesprochen werden kann (Bild 9). Der Kurkar steht in verschiedenen Zustandsformen vom festen Fels bis zu einem Lockergestein an (Bild 10). Der Grundwasserspiegel liegt in diesem Tunnelabschnitt in Höhe des Tunnelquerschnitts und im Westen dieses Abschnitts etwas über der Firste (Bild 8). Die Überlagerung beträgt zwischen 17 und 30 m. Die Tunnel liegen hier unterhalb der Jabotinsky Straße.

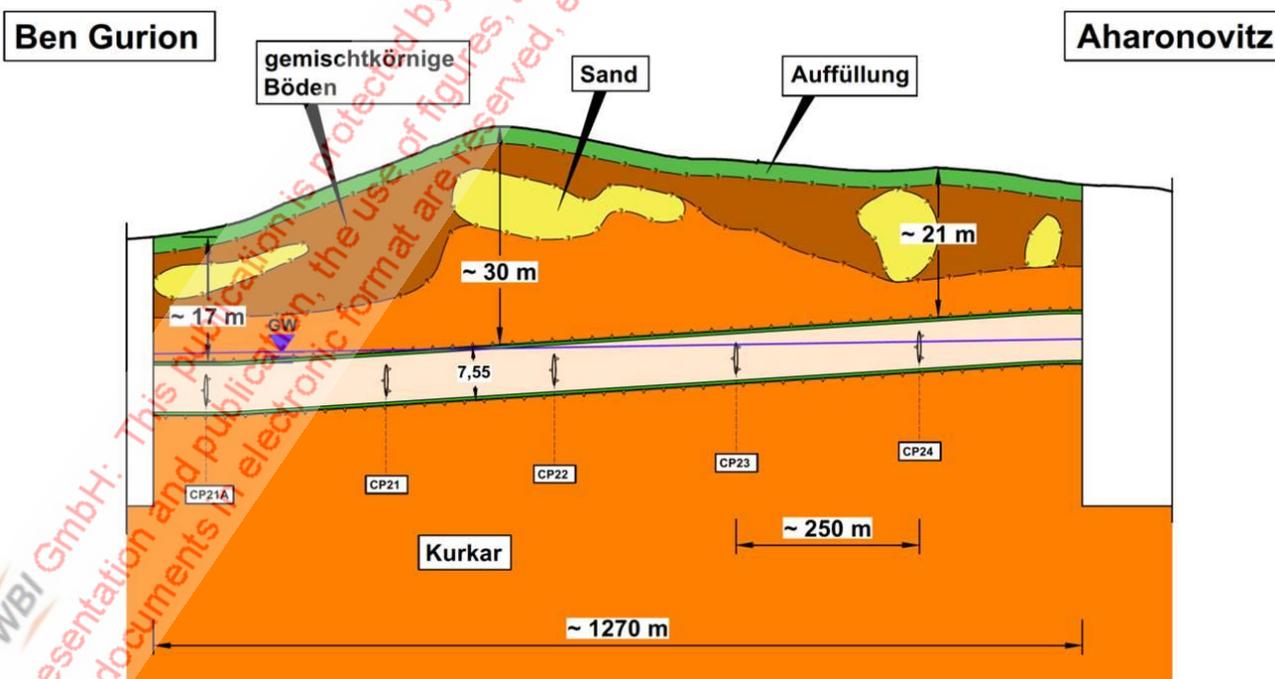


Bild 8: Abschnitt Aharonovitz - Ben Gurion, Längsschnitt

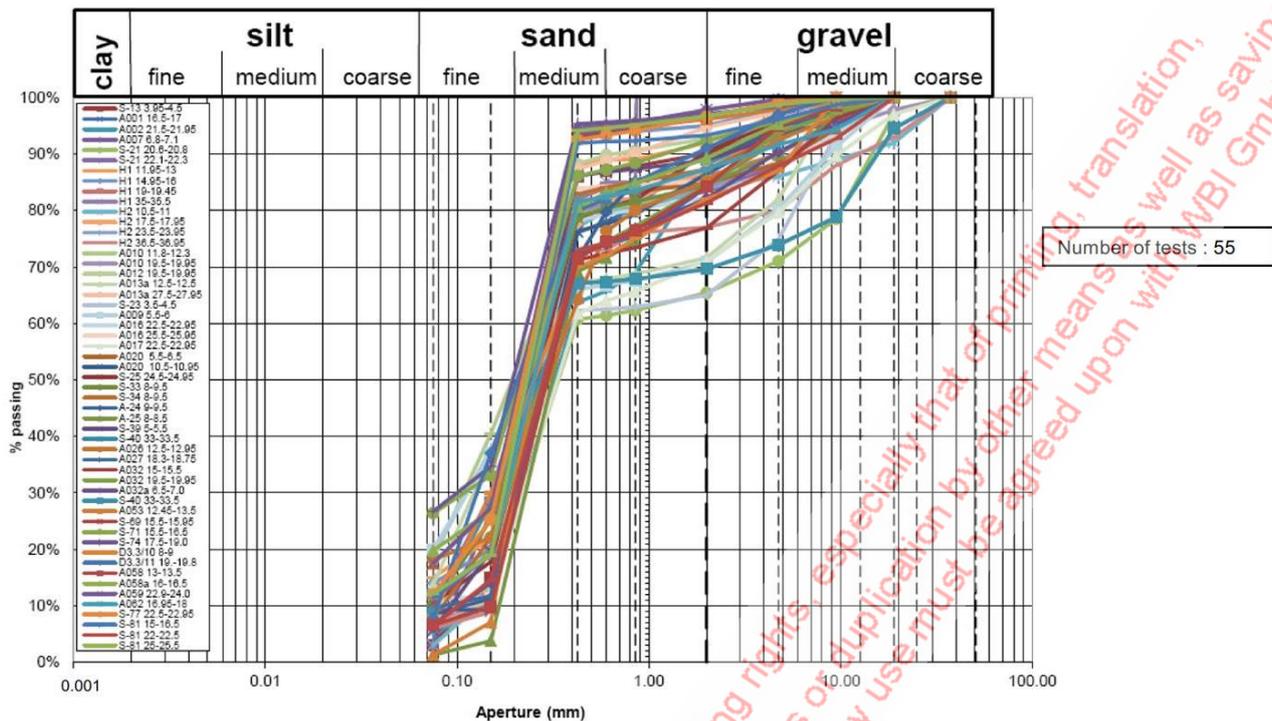


Bild 9: Kurkar, Kornverteilung



Bild 10: Kurkar, Bohrkerne, Beispiele

3. Tübbingplanung

Die Tübbing des maschinell vorgetriebenen Tunnels haben wie beschrieben eine Dicke von 35 cm. Die einzelnen Tübbingringe bestehen aus 5 Tübbing und einem Schlussstein (Bilder 11 und 12). Es werden Tübbing mit einer Breite von 1,5 m eingesetzt. Wegen der örtlich notwendigen geringen Kurvenradien werden auch Tübbing mit einer Breite von 1,2 m ausgeführt.

Die Tunnelstatik wird nach der FE-Methode mit dem WBI-eigenen Programmsystem FEST03 erstellt (Wittke 2014). Das FE-Netz für den Tunnelabschnitt zwischen den Stationen Aharonovitz und Ben Gurion zeigen die Bilder 11 bis 13. Die Tunnel besitzen hier einen Achsabstand von 11 m, so dass zwischen beiden Röhren nur ein 3,45 m breiter Bau-

grundpfeiler verbleibt (Bild 11). Bei der Ausfahrt aus der Baugrube am Depot Portal ist die Pfeilerdicke noch geringer. Die schmalen Baugrundpfeiler wirken sich ungünstig auf die Beanspruchung der Tübbinge aus.

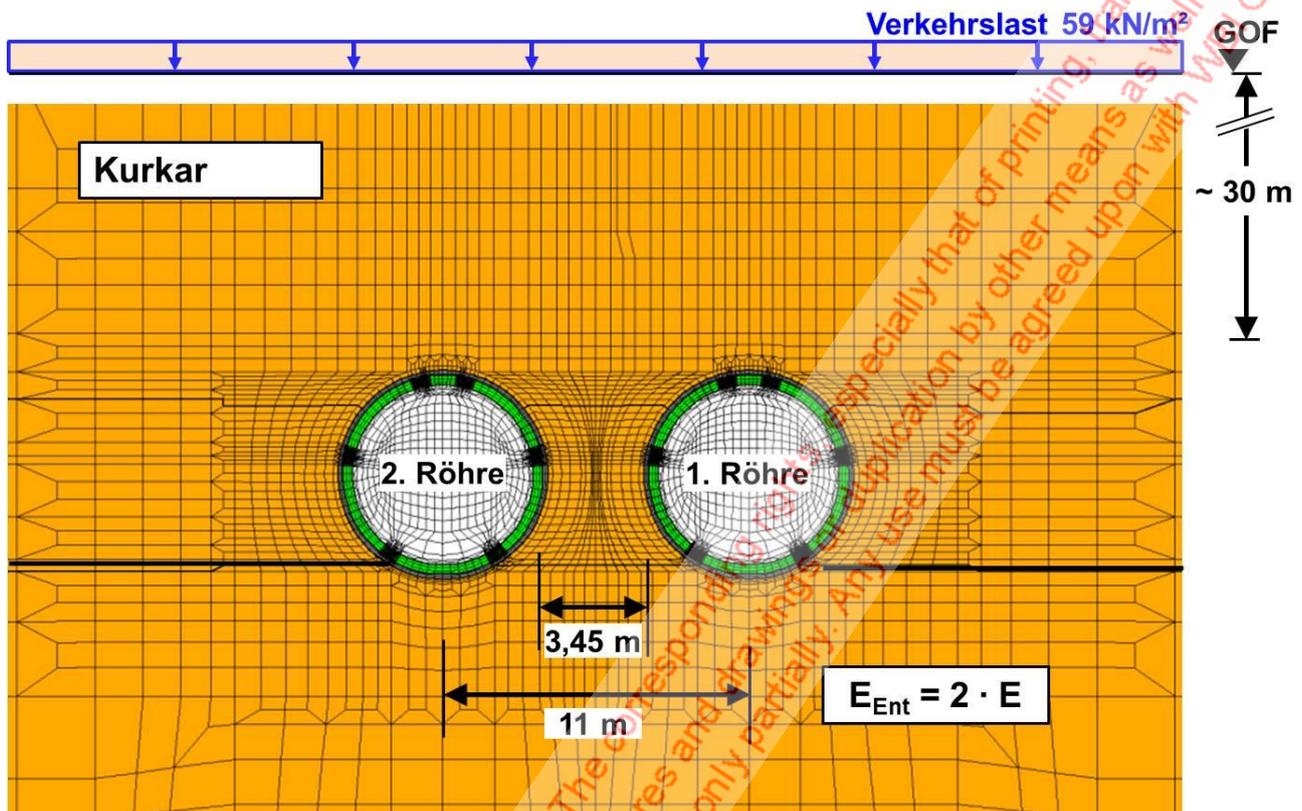


Bild 11: Abschnitt S2, FE-Netz, Detail

Die Tübbinge werden im FE-Netz durch drei Elementreihen, der Ringspalt wird durch 2 Elementreihen nachgebildet. Eine große Feinheit besitzt das FE-Netz im Bereich der Fugen (Bilder 12 und 13). Senkrecht zu der 19 cm breiten Kontaktfläche können keine Zugspannungen aufgenommen werden. Parallel dazu ist die Schubfestigkeit durch einen Reibungswinkel von 31° vorgegeben. Im Bereich des Schlusssteins ist ein guiding rod vorgesehen. Die Schrauben werden als Stabelemente aus Stahl simuliert (Bild 13).

Die Bilder 14 bis 18 zeigen beispielhaft einige Berechnungsergebnisse. Die vertikalen Normalspannungen in horizontalen Schnitten nach dem Auffahren der ersten Röhre zeigen eine Gewölbewirkung um den Tunnel herum (Bild 14). 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 15). Die Folge dieser Lastumlagerung ist eine ungünstige zusätzliche Verformung in Form einer Ovalisierung der ersten Röhre (Bild 16).

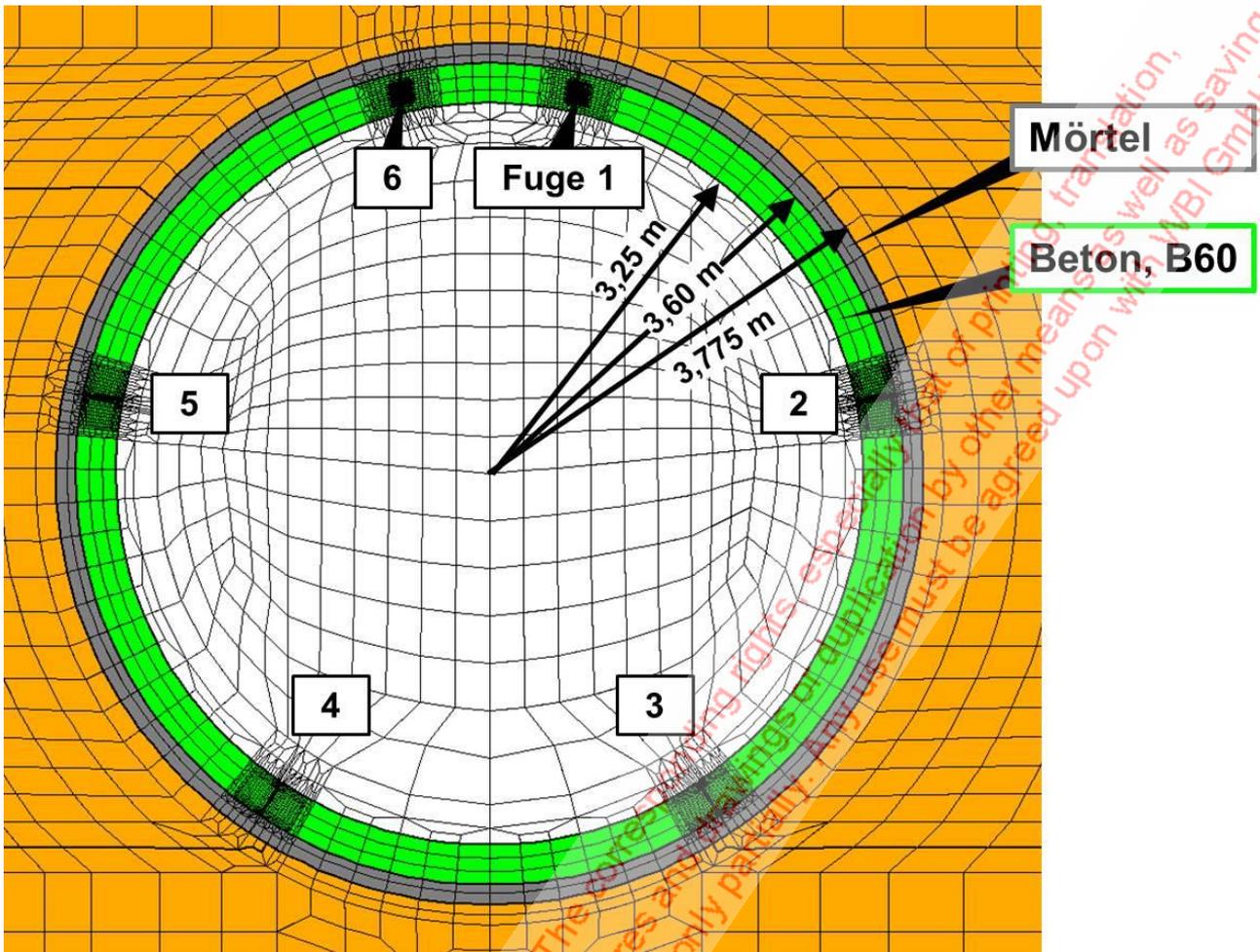


Bild 12: FE-Netz, Detail

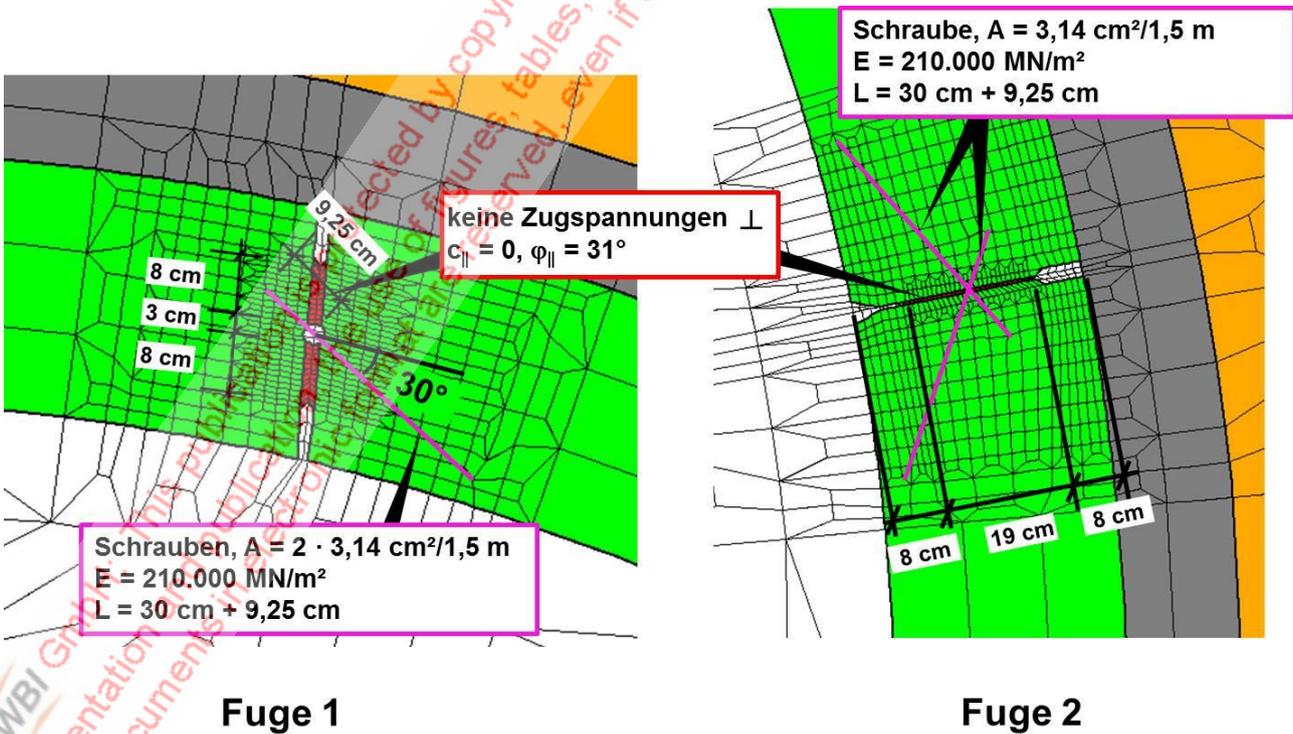


Bild 13: FE-Netz, Details Fugen 1 und 2

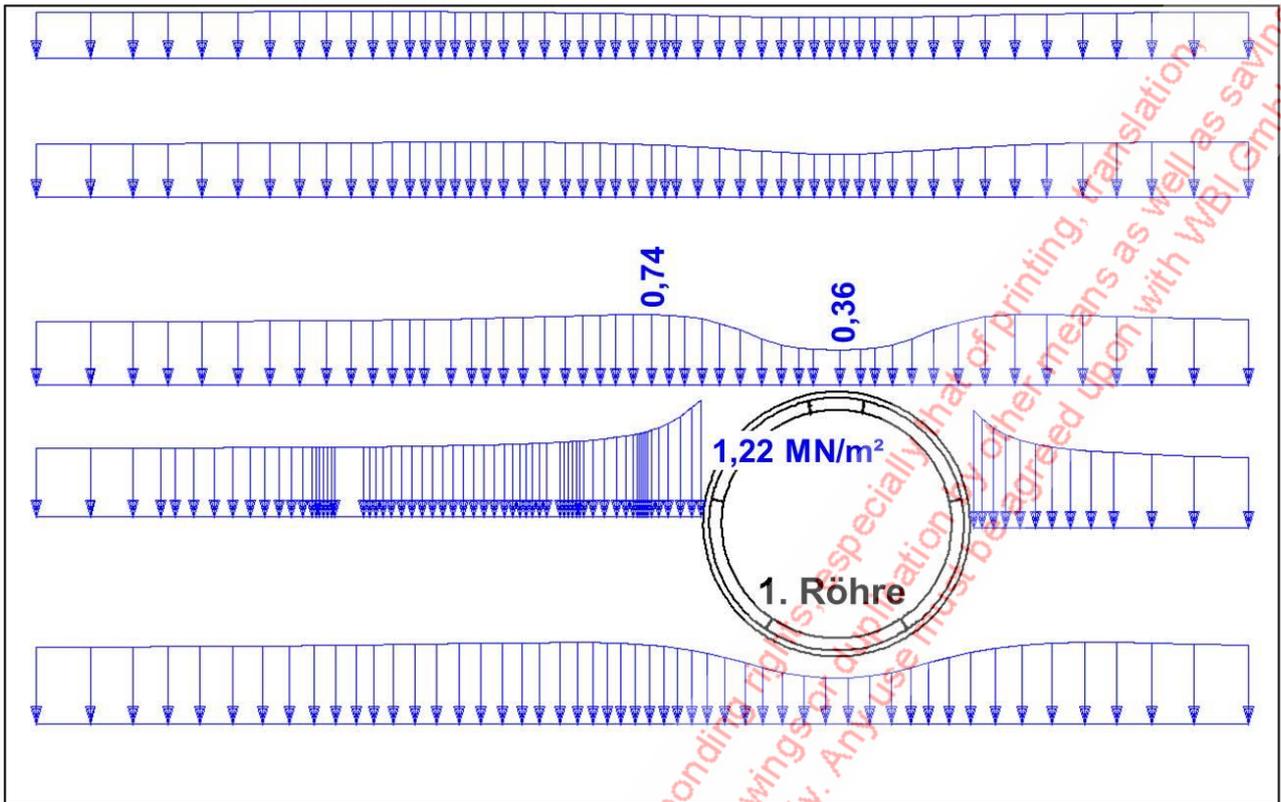


Bild 14: Vertikalspannungen nach Bau der ersten Röhre

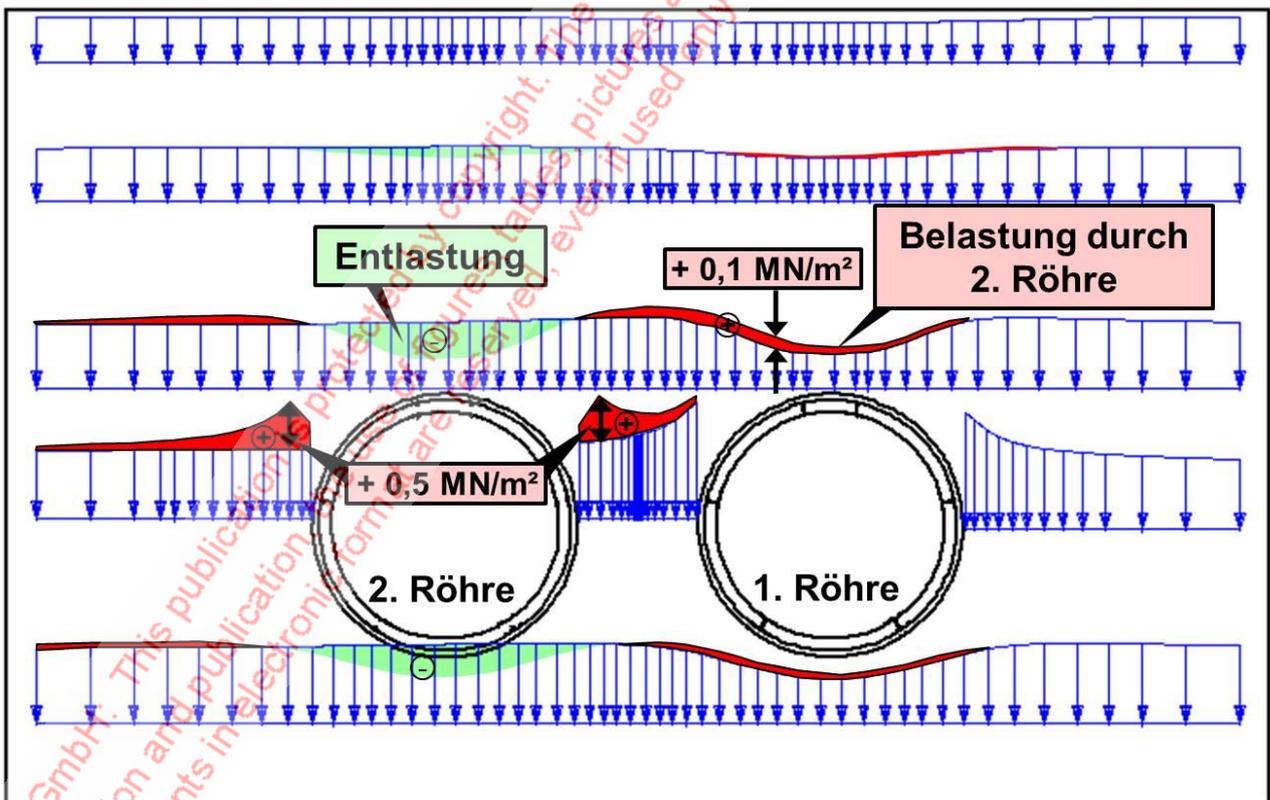


Bild 15: Änderungen der Vertikalspannungen infolge Bau der 2. Röhre

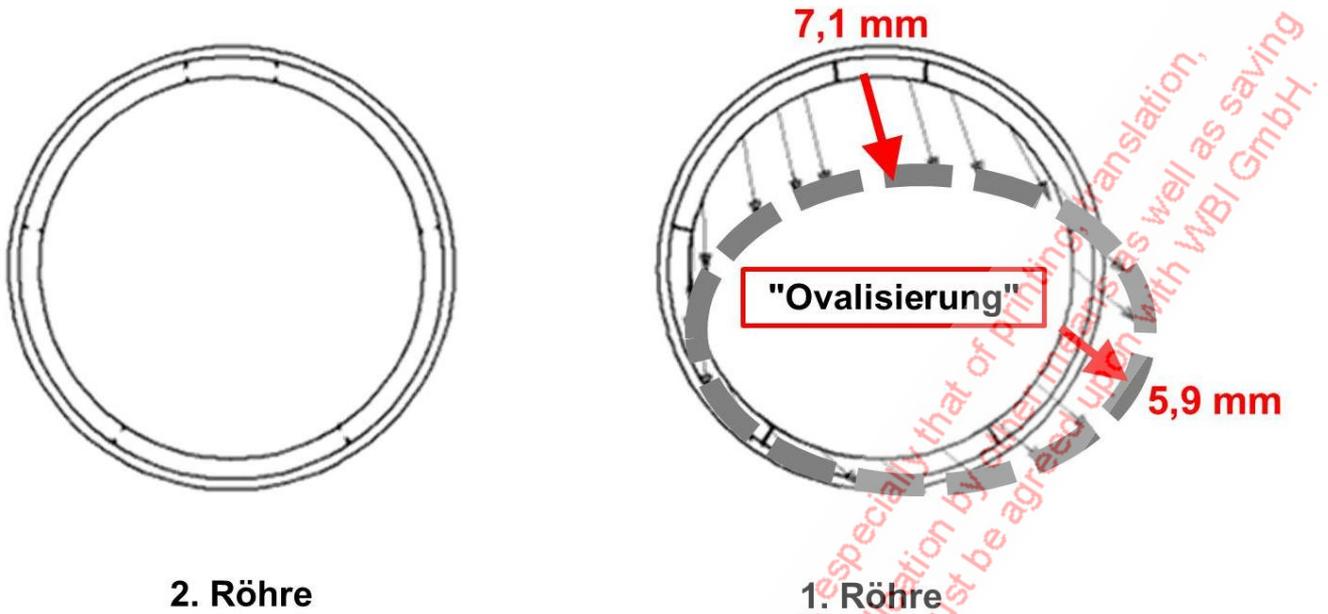


Bild 16: Verschiebungen 1. Röhre infolge Auffahren der Nachbarröhre

Die für diesen Bauzustand errechneten Schnittgrößen zeigt das Bild 17. 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 MN/m² (Bild 18, links). Als Folge des schmalen Baugrundpfeilers zwischen beiden Röhren erhöht sich die Beanspruchung auf der Innenseite der Fuge nach dem Auffahren der 2. Röhre auf mehr als den doppelten Wert (Bild 18, rechts).

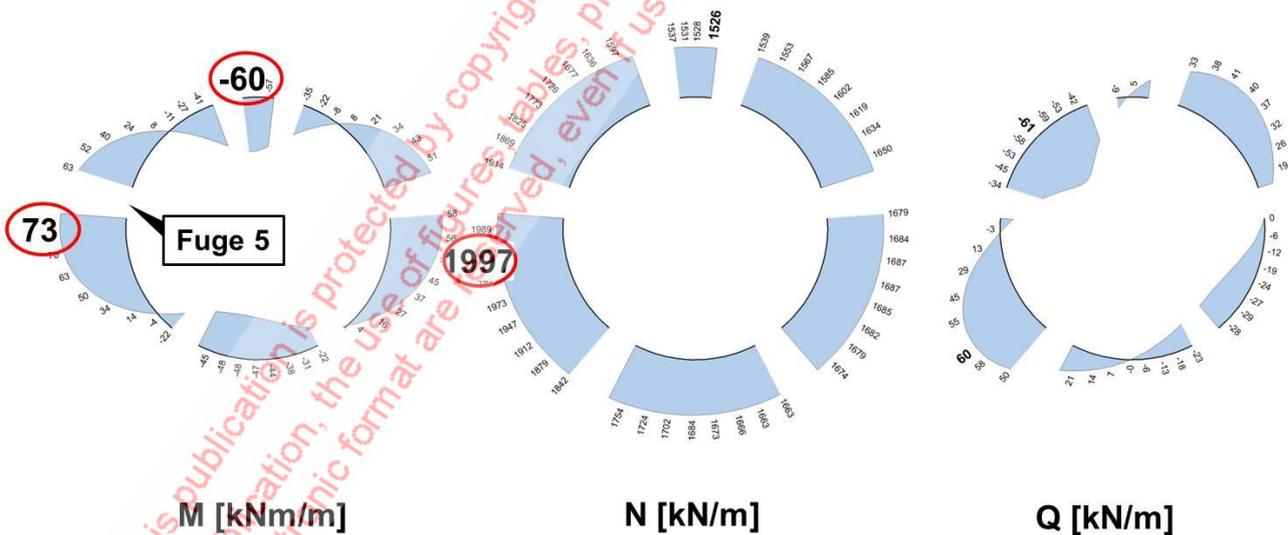


Bild 17: Schnittgrößen 1. Röhre nach Auffahren der Nachbarröhre

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.

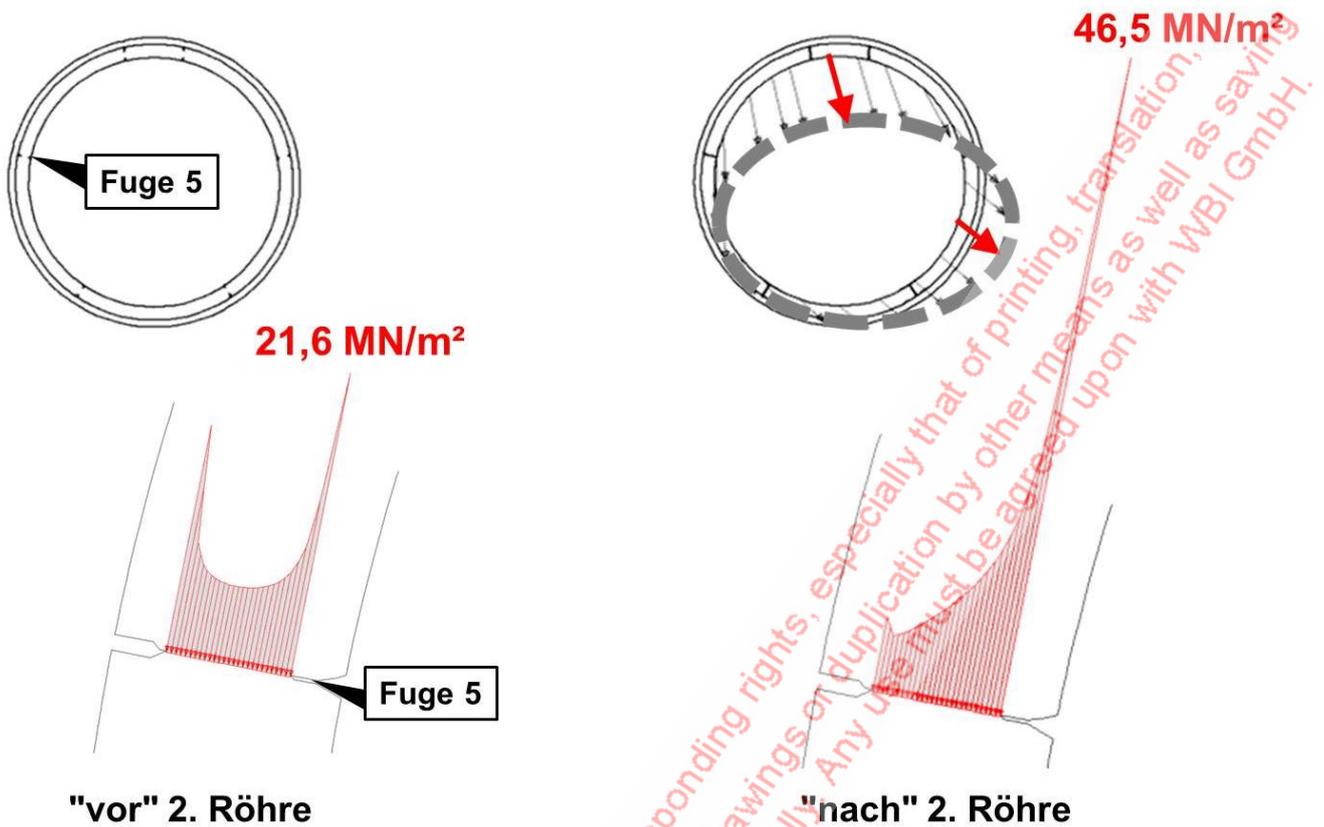


Bild 18: Normalspannungen in Fuge 5

4. Anfahrbereich Achse 8

Eine besondere Herausforderung für die Planung und die Ausführung stellt der Anfahrbereich der Achse 8 dar. Die konventionell aufzufahrende eingleisige Streckenröhre der Achse 8 stellt die Verbindung zwischen der Chamber 5/8 und dem Portal Shenkar dar (Bild 2). Der Tunnel schneidet die östliche Baugrubenwand der Chamber 5/8 im spitzen Winkel in der Nähe der Stirnwand der Baugrube, die das Portal für die maschinell aufzufahrenden Tunnel der Achsen 5 und 6 darstellt (Bild 19). Unmittelbar neben der Baugrube und oberhalb der Achse 8 verläuft die Schnellstraße #4.

Die geplante Öffnung ist ca. 31 m lang. Über zugehörige Planungs- und Ausführungsarbeiten wird an anderer Stelle berichtet werden.

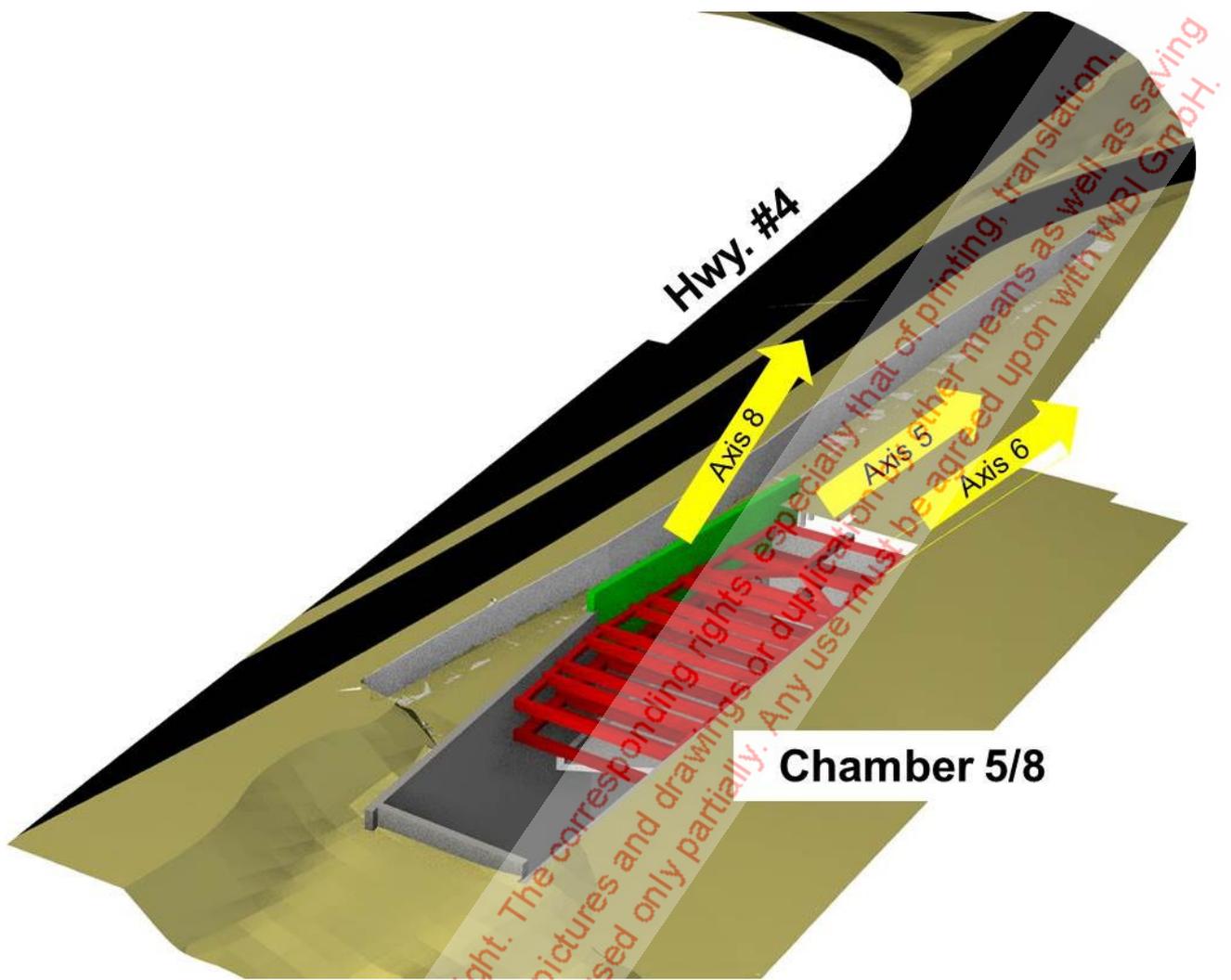


Bild 19: Achse 8 - Anfahrbereich, Bestand

5. Ausblick

Der Vortrieb der Röhre der Achse 6 mit der TVM hat Ende Mai 2017 begonnen (Bilder 20 und 21). Zwischenzeitlich wurde die Eisenbahnstrecke unter laufendem Betrieb unterfahren. Die aufgetretenen Senkungen entsprechen den Prognosen und liegen im Millimeterbereich. Bisher wurden maximale Vortriebsleistungen von ca. 25 m am Tag erreicht. Voraussichtlich im Spätsommer wird der Vortrieb der zweiten Röhre ausgehend vom Depot Portal beginnen.

Literatur

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.

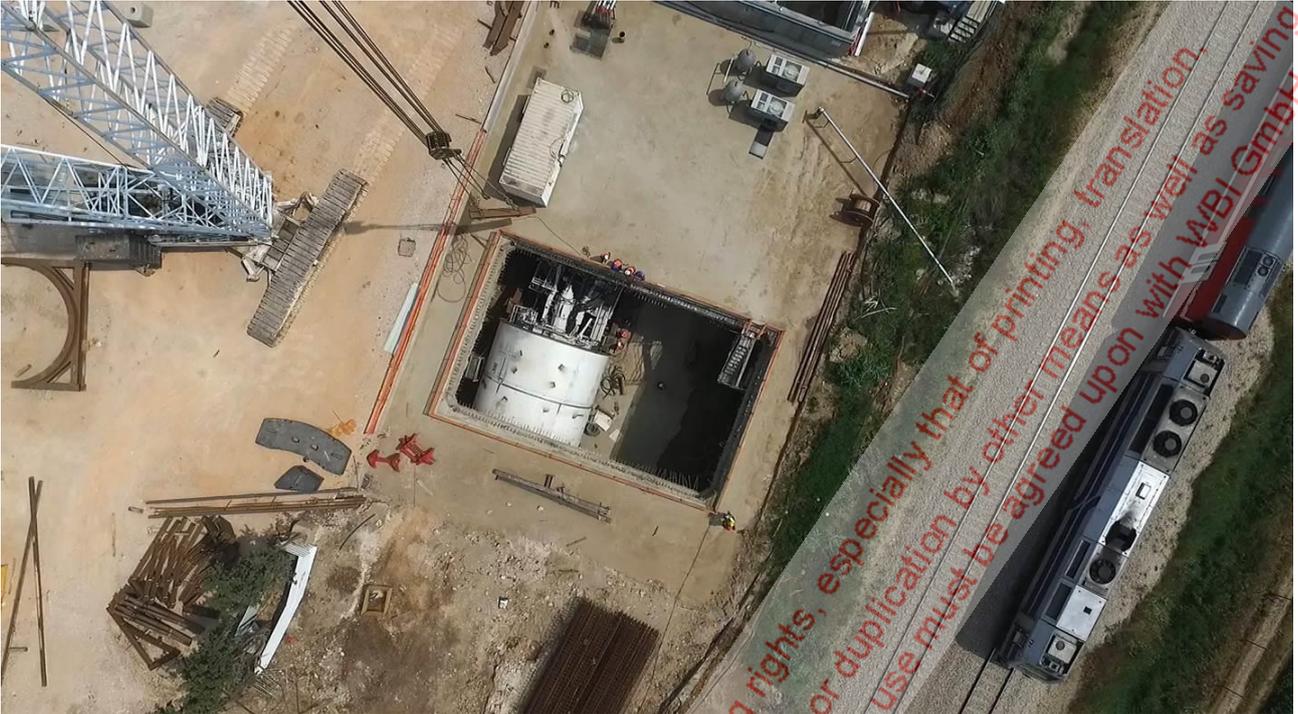


Bild 20: TVM am Depot Portal, Mai 2017



© Bild 21: Tübbinge