

Red Line, Tel Aviv, Eastern Section - Einfluss der Eigenschaften des Ringspaltmörtels auf die Bemessung der Tübbingauskleidung

Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann, Dr.-Ing. Martin Wittke,
Nadav Teboulle, Jiang Aimin

Zusammenfassung

Der Ostabschnitt der Red Line der U-Bahn Tel Aviv wird von einem israelisch - chinesischen Konsortium mit zwei Tunnelbohrmaschinen der Firma Herrenknecht aufgeföhren. Der größte Teil dieses Abschnitts liegt in einem grobkörnigen, teilweise mit Kalk verfestigten Untergrund (Kurkar).

Der zunächst für die Ringspaltverfüllung vorgesehene Bi-Komponenten-Mörtel wurde wegen der Sulfathaltigkeit des Grundwassers durch einen einfachen Zementmörtel ersetzt.

Die Verformbarkeit des verwendeten frischen Mörtels wurde in einem Großödometer im Labor der WBI GmbH untersucht. Außerdem wurden das Ausbreitmaß und die Dichte des frischen Mörtels bestimmt.

Es zeigte sich, dass der Mörtel unter dem im Ödometer simulierten Mörtelverpressdruck in Abhängigkeit von der Zeit entwässert wird und dass der Steifemodul mit zunehmender Normalspannung (Mörtelverpressdruck) anwächst. Ab einem Mörtelverpressdruck von ≥ 1 bar wächst der Steifemodul des Frischmörtels auf Werte von ≥ 10 MN/m² an.

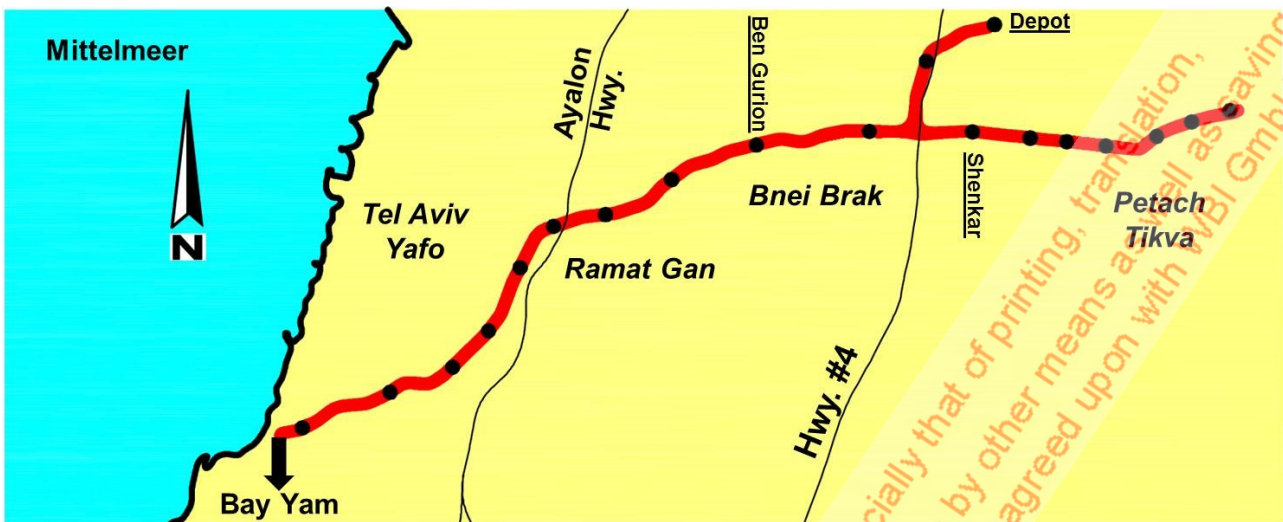
Nach der Erhärtung beträgt die Festigkeit des Mörtels ~ 4 bis 6 MN/m². Der E-Modul liegt in der Größenordnung von 9.000 bis 10.000 MN/m².

Die Beanspruchung und Verformung der Tübbingringe infolge der Bettung im weichen Mörtel und aufgrund des Mörtelverpressdrucks sowie der Vortriebspresenkräfte wurde in räumlichen FE-Berechnungen untersucht. Es zeigt sich, dass die ermittelten Momente und Normalkräfte sowie die Verschiebungen gering sind, solange ein Mörtelverpressdruck von 1 bar nicht unterschritten wird.

Aufgrund der Untersuchungen und der durchgeführten Berechnungen konnte eine vom AG geforderte Begrenzung der Vortriebsgeschwindigkeit vermieden werden.

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, Wittke & Wittke & Ashkenazi & Gang 2017). 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.



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

Bild 1: Red Line Tel Aviv, Übersicht

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. 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.

Der Tunnelabschnitt ausgehend vom Depot-Portal bis zur Station Em Hamoshavot wurde in der Zwischenzeit mit zwei EPB-Maschinen der Firma Herrenknecht aufgeföhren (Bild 2 und 3). Hier liegen die Tunnelröhren im Ton. In den weiteren Abschnitten bis zur Station Ben Gurion, die sich derzeit im Bau befinden, verlaufen die Tunnel dagegen überwiegend im Kurkar (Bild 4 und Wittke & Wittke & Ashkenazi & Gang 2017). Das ist ein in weiten Teilen der Stadt Tel Aviv anstehendes Sediment, das hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung als Kies-Sand angesprochen werden kann. Der Kurkar steht in verschiedenen Zustandsformen vom festen Fels bis zu einem Lockergestein an. Außerdem sind in diesem Tunnelabschnitt enggestufte Sande und gemischtkörnige Böden zu erwarten.

Sowohl der Kurkar als auch die eng-gestufte Sande weisen eine vergleichsweise hohe Durchlässigkeit in der Größenordnung von 10^{-4} m/s auf. Die Tunnel liegen überwiegend unterhalb des Grundwasserspiegels (Wittke & Wittke & Ashkenazi & Gang 2017).

Die Tunnel haben einen Kreisquerschnitt mit einem Innendurchmesser von 6,5 m (Wittke & Wittke & Ashkenazi & Gang 2017). 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.

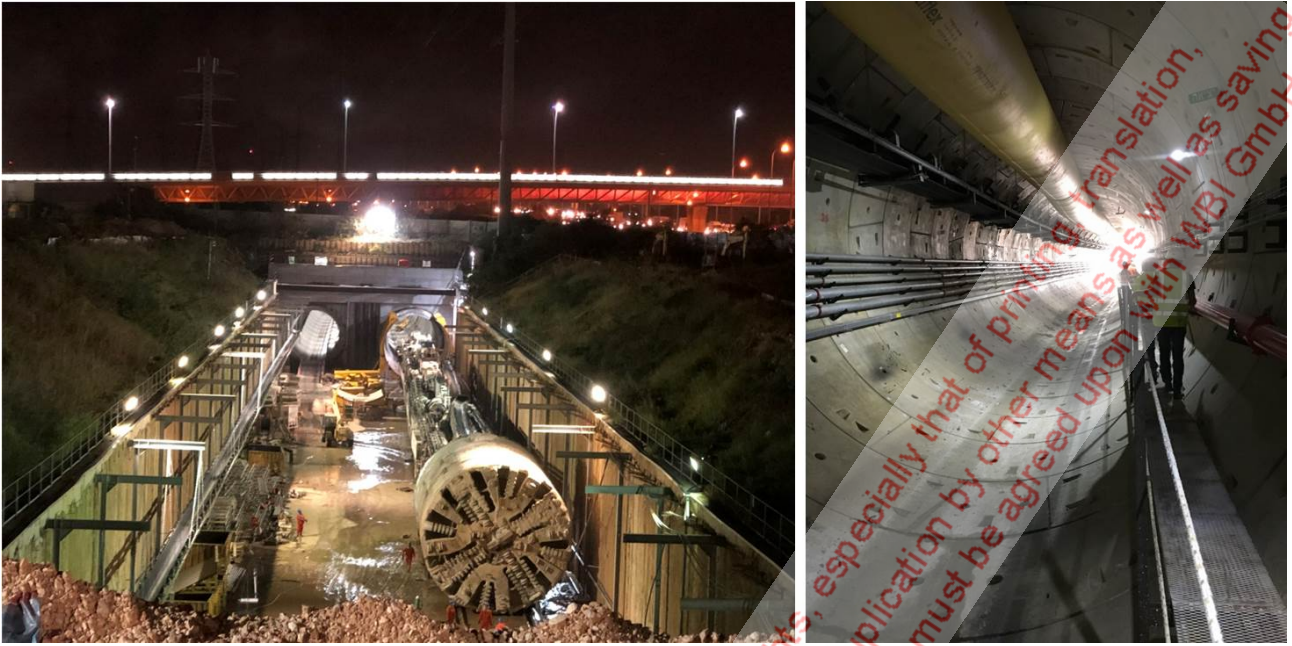


Bild 2: TBM und fertige Tunnelröhre



Bild 3: Depot

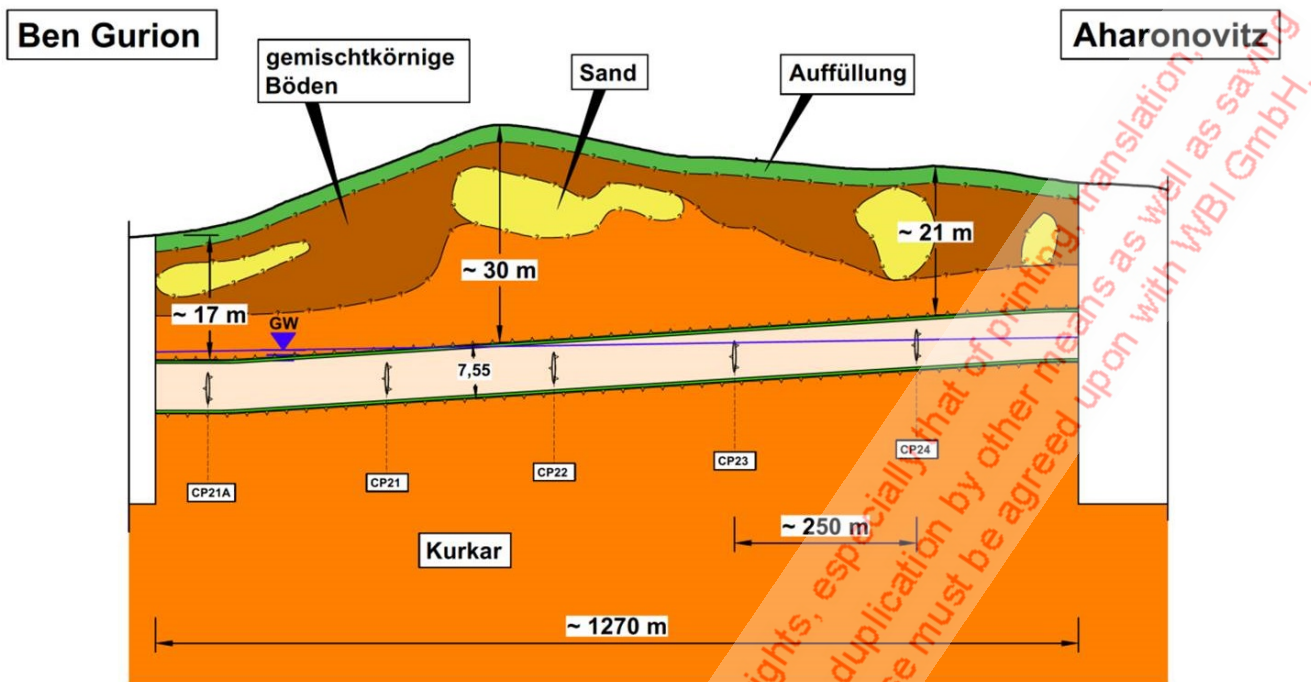
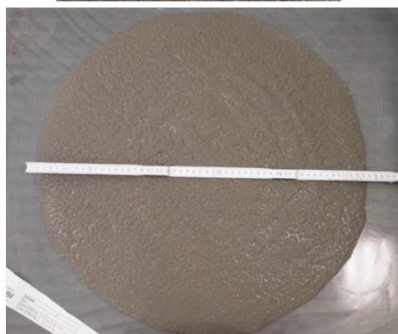


Bild 4: Abschnitt Aharonovitz - Ben Gurion, Längsschnitt

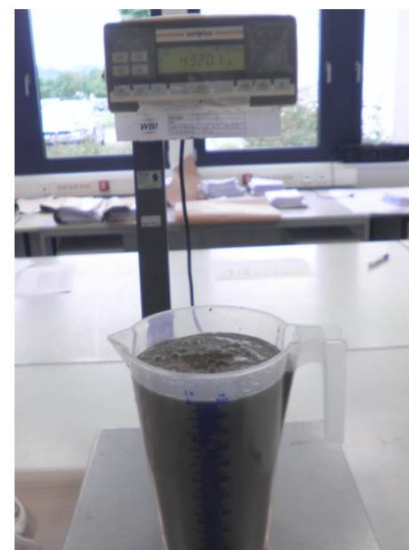
2. Ringspaltmörtel

Es wird ein zementbasierter Mörtel angewendet. Die verwendeten Mischungen sind in Bild 5 zusammengestellt. Der Frischmörtel hat eine Dichte von $2,1 \text{ g/cm}^3$. Die Verarbeitbarkeit wurde durch Ausbreitversuche nachgewiesen, in denen Ausbreitmaße von ca. 50 bis 60 cm über einen Zeitraum von bis ca. 6 h nach Herstellung der Mischung bestimmt werden konnten.

	Mix A	Modified Mix A
	kg/m ³	kg/m ³
Cement CEM II 42.5N/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



**Flow Table Test
(horizontal slump) acc. to
DIN EN 12350-5**



$$\rho = 2,1 \text{ g/cm}^3$$

Density

Mix Design

Bild 5: Mörtelzusammensetzung und Test-Programm

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 des verwendeten Ringspaltmörtels durchgeführt (Bild 6). 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.

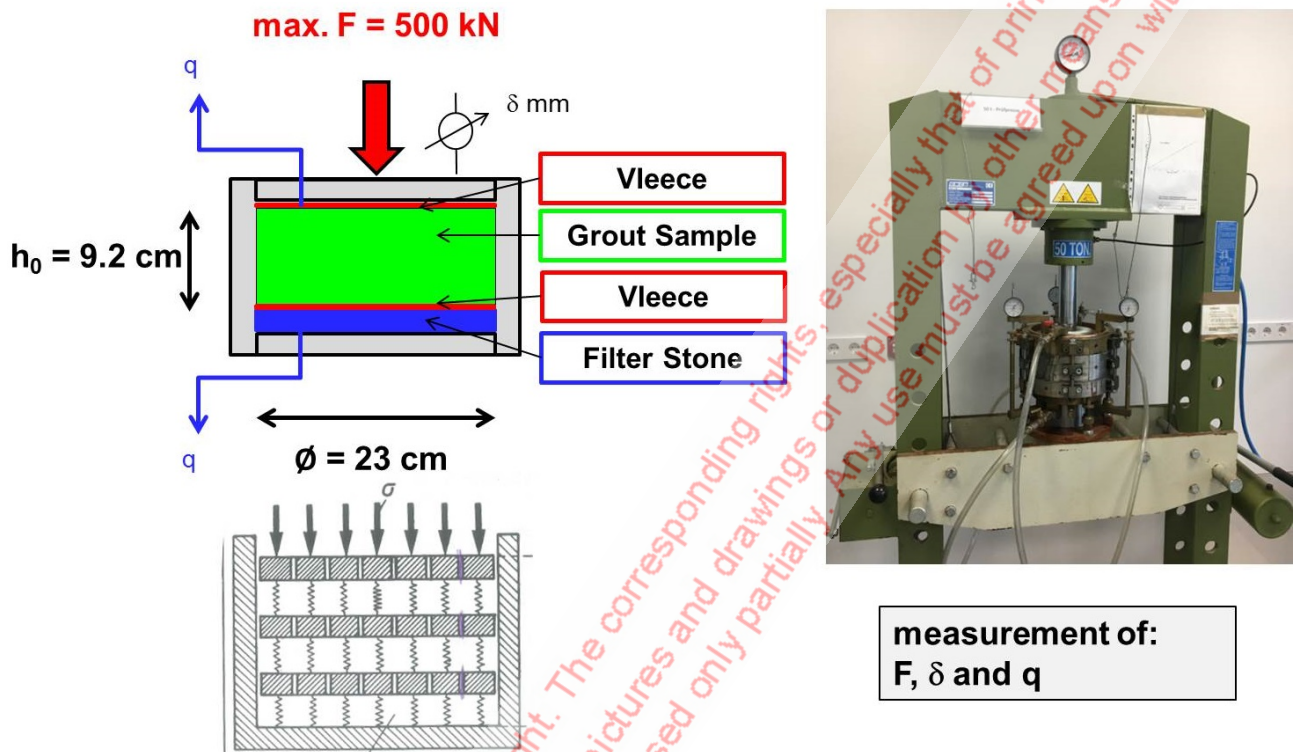


Bild 6: Ödometer-Versuch

Die frisch angemischten Mörtelproben wurden in den Ödometerring eingebaut (Bild 7, links). Unterhalb und oberhalb der Proben wurden jeweils ein Vlies und Filtersteine angeordnet (Bild 6). Die Belastung erfolgt über eine 50 t-Prüfpresse von oben.

Die Versuchseinrichtung ermöglicht es, „undrained“ und „drained“ Versuche durchzuführen. Vor dem Hintergrund der vergleichsweise hohen Durchlässigkeit des umgebenden Bodens (vgl. Abschnitt 1) wurden im vorliegenden Fall drainierte Versuche durchgeführt (freier Abfluss von Überschusswasser über Vlies und Filtersteine), um die tatsächlichen Verhältnisse im Versuch richtig wiederzugeben.

Es wurden Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen und an unterschiedlich alten Proben durchgeführt. Außerdem wurden verschiedene Mischungen berücksichtigt. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird beispielhaft das Ergebnis eines Versuchs an einer 30 Minuten alten Probe vorgestellt, die bei einer Temperatur von $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert wurde.

Die Belastung erfolgte im betrachteten Beispiel schrittweise in 8 Stufen (Bilder 8 und 9). Anschließend wurde die Probe in 2 Stufen wieder entlastet. Die Belastung der Probe wurde in jeder Stufe über einen Zeitraum von ca. 15 bis 20 Minuten konstant gehalten. Zu-

sätzlich zur aufgebrachtten Kraft wurden die Setzung der Probe und die ausgepresste Wassermenge gemessen. Aus den Messergebnissen wird der Steifemodul der Probe für unterschiedliche Laststufen ermittelt (Bild 8).

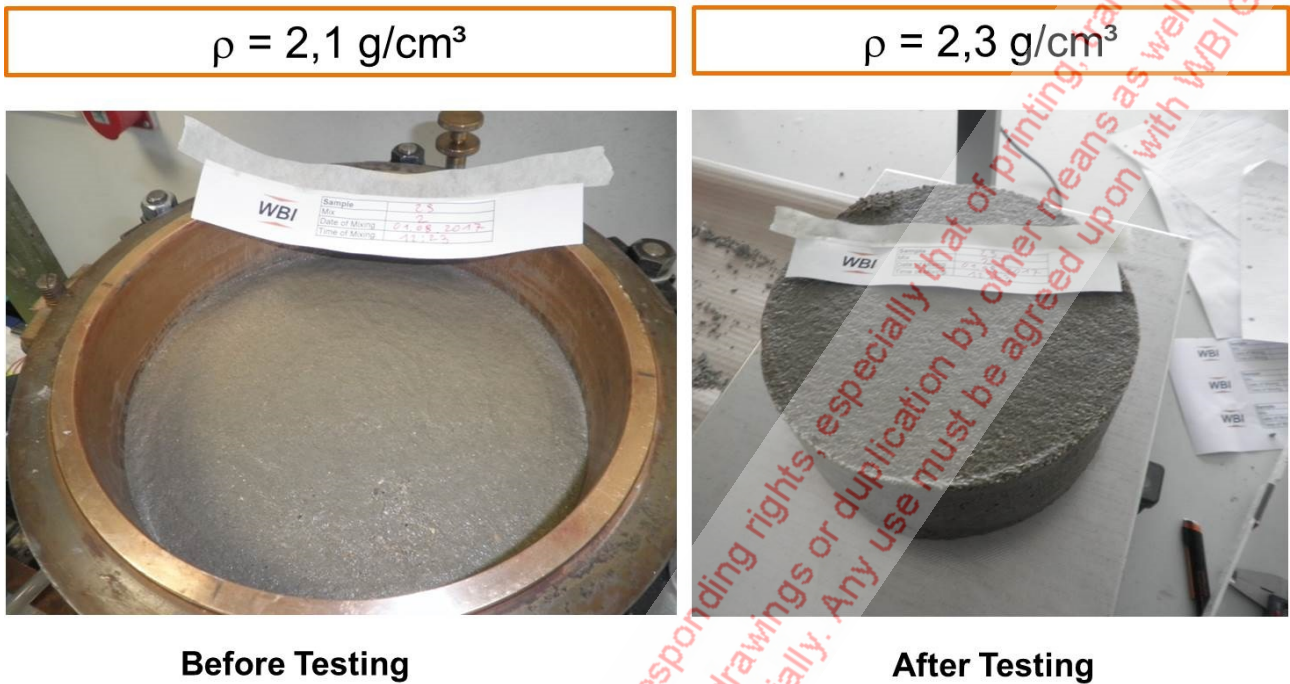


Bild 7: Probe 29 vor und nach dem Ödometer-Versuch

① Load Stage

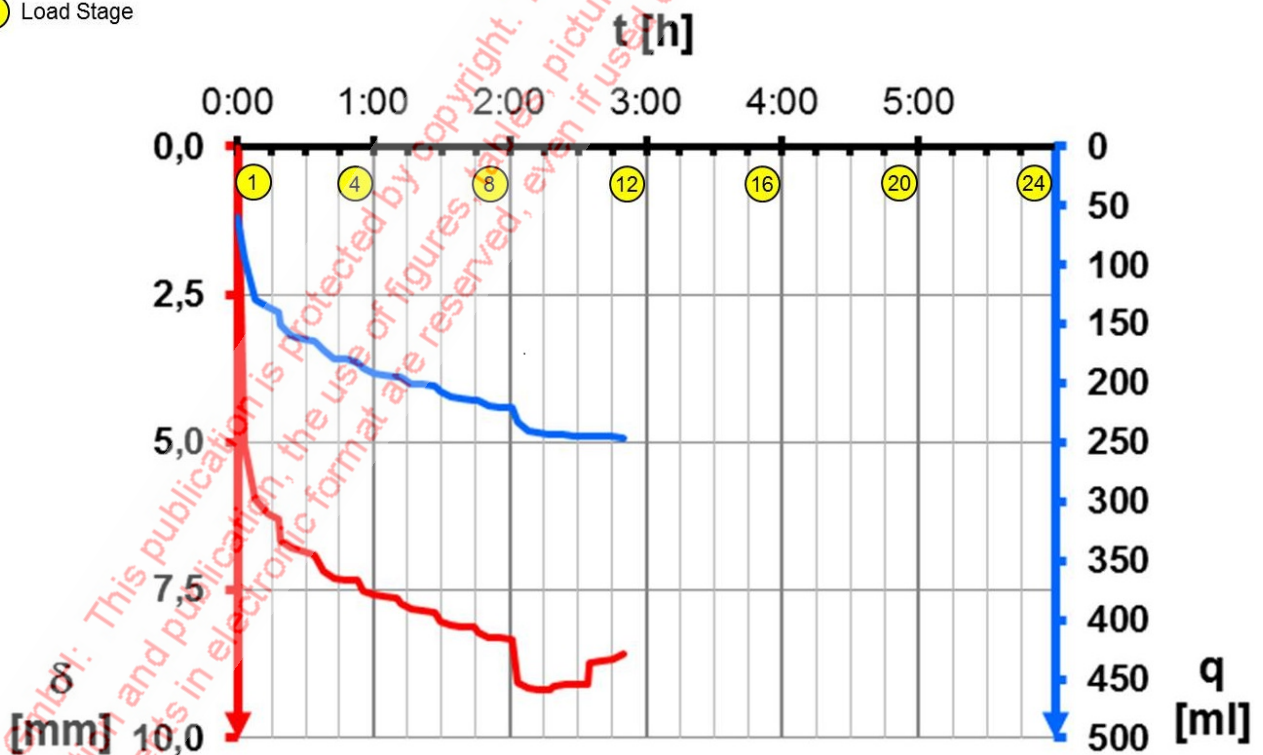


Bild 8: Ödometer-Versuch, Dränierte Wassermenge und Setzung in Abhängigkeit von der Zeit, Probe 28, Mischung 2, $t = 0,5 \text{ h}$, $T = 22,3 \text{ °C}$

① Load Stage

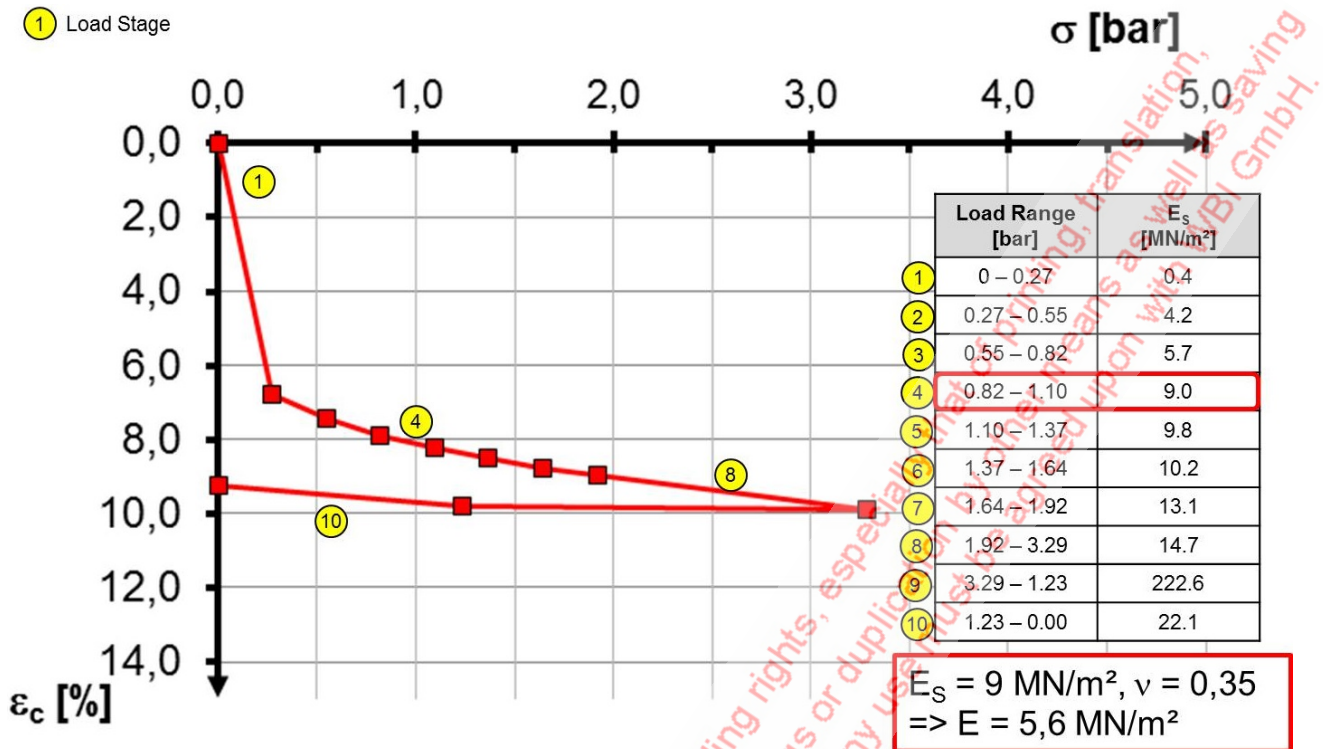


Bild 9: Oedometer-Versuch, Last-Setzungs-Kurve, Probe 28, Mix 2, $t = 0.5 \text{ h}$, $T = 22.3 \text{ }^\circ\text{C}$

Erwartungsgemäß nimmt der Steifemodul mit steigender Last zu. Während sich für die erste Laststufe bis 0,27 bar ein Steifemodul von nur 0,4 MN/m² ergibt, zeigt die Laststufe von 0,82 bis 1,1 bar bereits einen Steifemodul von 9 MN/m² (Bild 9). Unter der Annahme einer Querdehnungszahl von 0,35, die für den frischen Mörtel näherungsweise angenommen werden kann, ergibt sich für diese Laststufe ein E-Modul von 5,6 MN/m².

Für die Druckstufe von 1,9 bis 3,3 bar ergibt sich ein Steifemodul von 14,7 MN/m². Für die Entlastung ergeben sich erwartungsgemäß deutlich größere Werte.

Die zeitliche Entwicklung der gemessenen Setzungen und Wassermengen zeigt insbesondere bei der ersten Laststufe eine gewisse Zeitabhängigkeit (Konsolidation). Durch das Auspressen des Überschusswassers erhöht sich auch die Dichte des Mörtels. Nach dem Versuch wurde eine Dichte von 2,3 g/cm³ ermittelt (Bild 7).

Um ein Aufschwimmen der Tübbingröhre zu vermeiden, ist gemäß Thewes & Budach 2009 eine Scherfestigkeit von 2 kN/m² erforderlich. Diese Vorgabe wird vom verwendeten Mörtel erfüllt.

Für die Bemessung der Tübbingröhre im Endzustand bzw. für die Bemessung der Tübbinge der ersten Röhre während der Vorbeifahrt mit der zweiten Maschine ist die Verformbarkeit des erhärteten Ringspalzmörtels wichtig. Diese wurde anhand von einaxialen Druckversuchen mit Messung der Dehnungen der Probe bestimmt. Es ergaben sich E-Moduln von 8.000 bis 10.000 MN/m² (Bild 10) und somit Werte, die deutlich größer sind als die des umgebenden Bodens.



Mix 1, Sample 3

Age: 14 days
 $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$
 $w = 14.5 \%$
 $\text{UCS} = 4.5 \text{ MN/m}^2$
 $\nu = 0.13$
 $E = 8,638 \text{ MN/m}^2$



Mix 1, Sample 2

Age: 14 days
 $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$
 $w = 15.5 \%$
 $\text{UCS} = 4.5 \text{ MN/m}^2$
 $\nu = 0.19$
 $E = 8,823 \text{ MN/m}^2$



Mix 2, Sample 14

Age: 12 days
 $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$
 $w = 14.4 \%$
 $\text{UCS} = 5.8 \text{ MN/m}^2$
 $\nu = 0.05$
 $E = 10,079 \text{ MN/m}^2$

Bild 10: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

3. Standsicherheitsnachweis

Die Bemessung der Tübbinge erfolgte auf der Grundlage von 3D-FE-Berechnungen mit dem WBI-eigenen Programmsystem FEST03 (s. auch Wittke & Wittke & Ashkenazi & Gang 2017). Für den hier betrachteten Einbauzustand wurden die Berechnungen mit dem in den Bildern 11 bis 13 dargestellten FE-Netz durchgeführt.

Insgesamt werden 4 Tübbingringe betrachtet. Der erste Ring wird im Schutz des Schildmantels errichtet und durch die Vortriebspresen gehalten (Bild 14). Im Bereich des zweiten Rings 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 Wasserdruck beansprucht.

Für den Bereich des dritten Rings wird angenommen, dass der Mörtel angesteift ist. Auf der Grundlage der Ergebnisse der in Abschnitt 2 beschriebenen Laborversuche wird der E-Modul des Mörtels mit 5 MN/m² angenommen (Bild 14). 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/m² etwas höher angenommen.

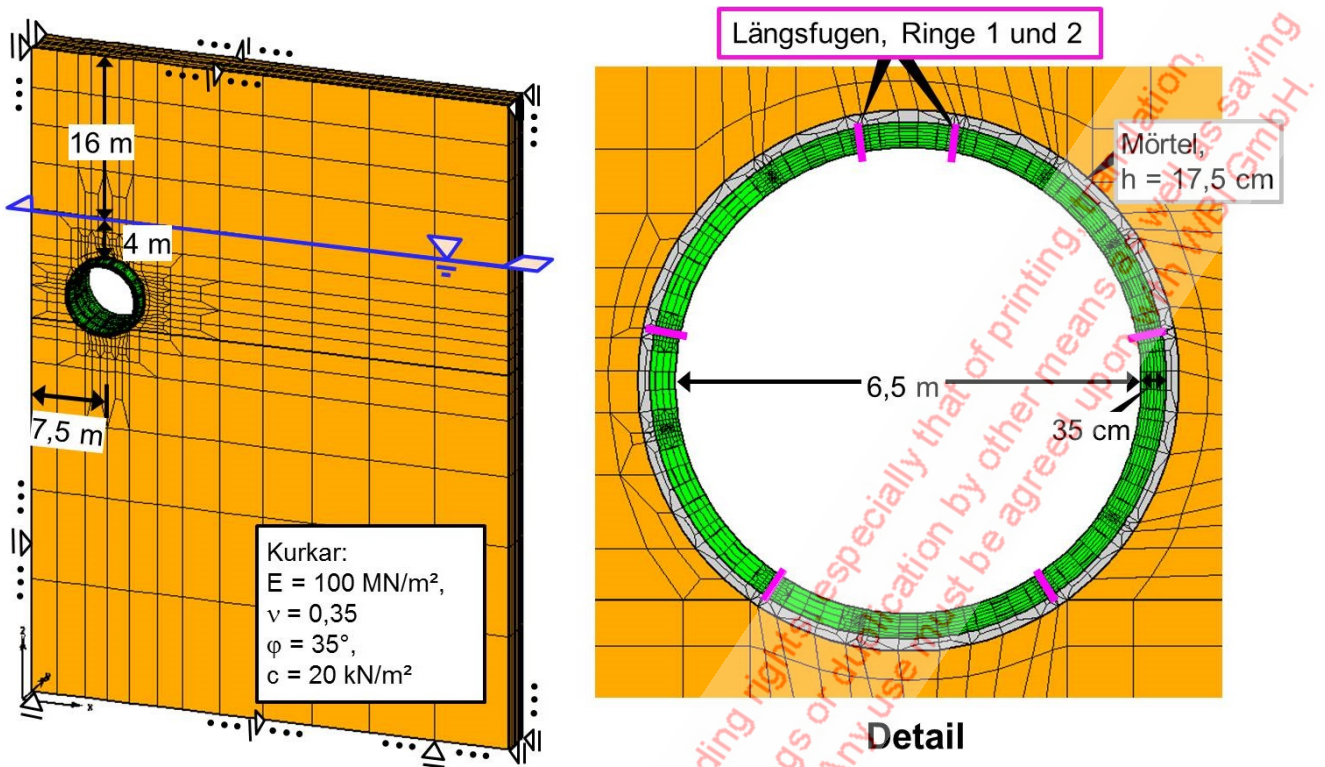


Bild 11: FE-Netz und Randbedingungen

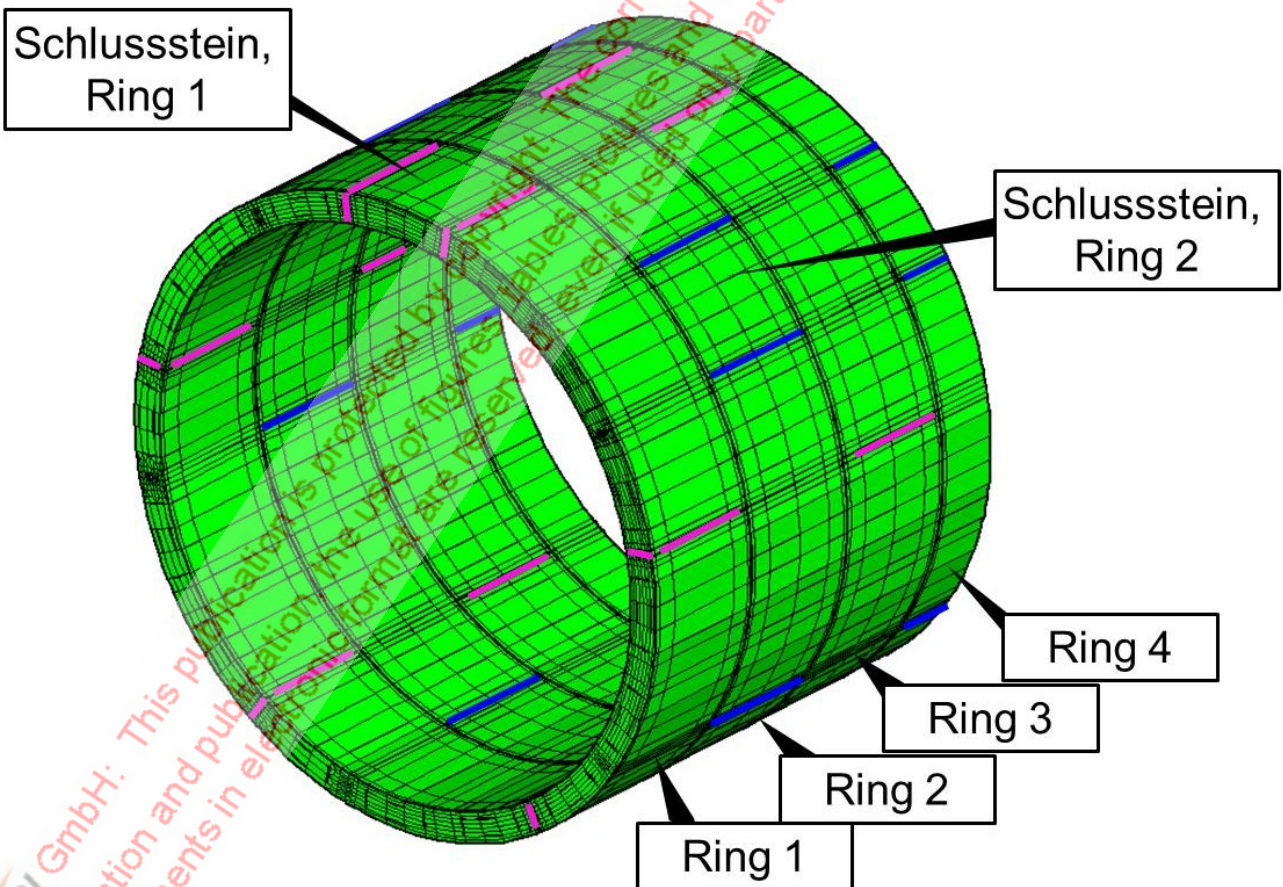


Bild 12: FE-Netz, Detail Tübbingringe

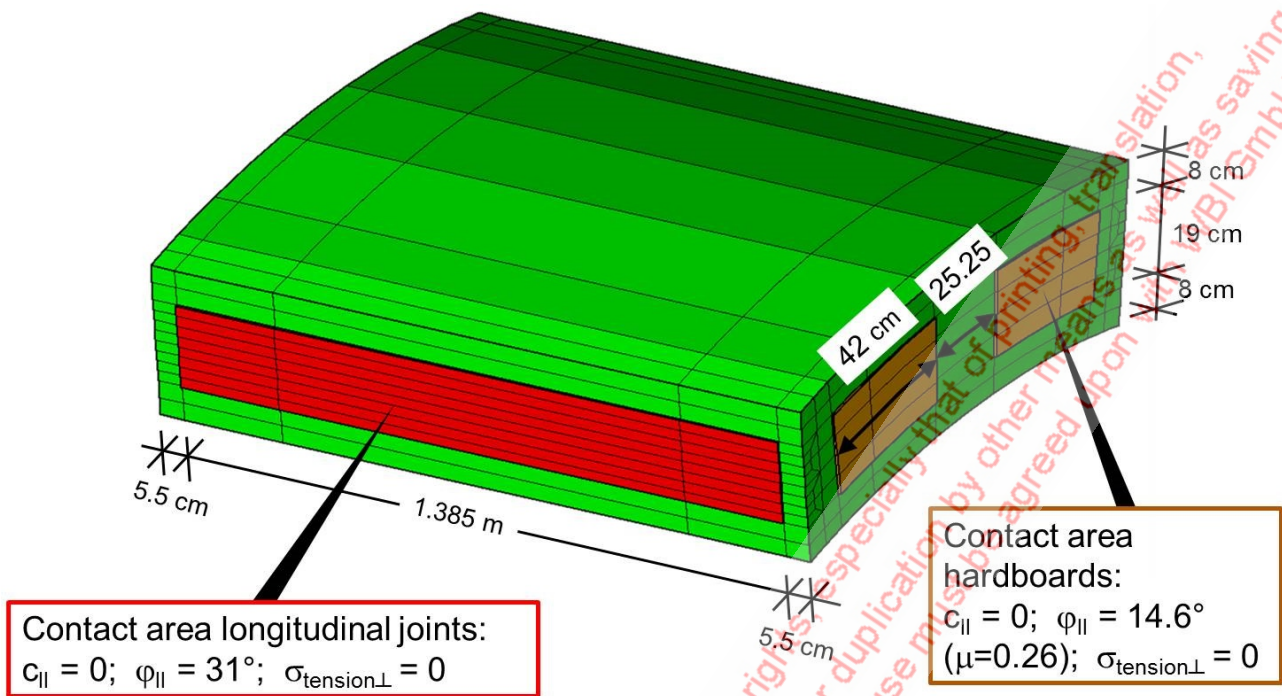


Bild 13: FE-Netz, Detail Schlussstein, Ring 1

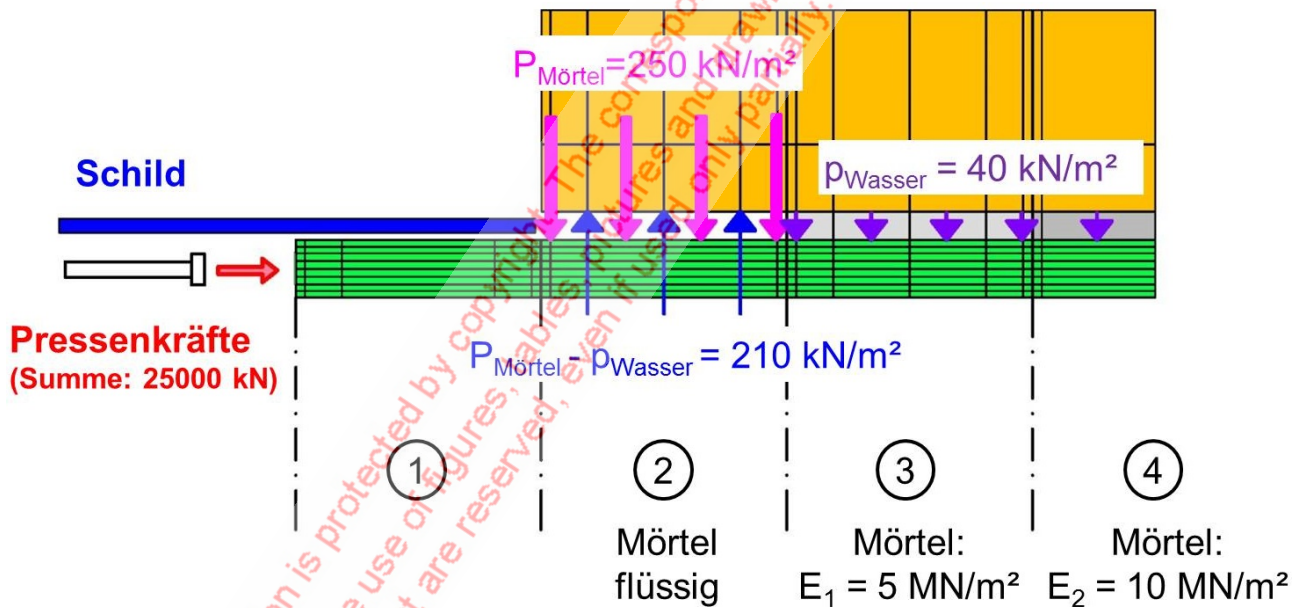


Bild 14: Annahmen FE-Berechnung (Firstbereich)

Die aus den Berechnungen resultierenden Normalspannungen in den Tübbing der Ringe 2 und 3 sind in Bild 15 dargestellt. Man erkennt, dass die Tübbinge überwiegend auf Normalkraft beansprucht werden. Die Beanspruchung im Bereich des Rings 3 ist etwas größer als die im Ring 2.

Mit den getroffenen Annahmen ergeben die Berechnungen für die Tübbingröhre eine geringfügige Hebung im mm-Bereich (Bild 16). Die errechneten Verschiebungen stimmen gut mit den Messergebnissen überein (± 2 mm). Die viskoplastischen Verschiebungen sind

nur gering und konvergieren im Verlauf der Berechnungen (Bild 17). Die Berechnungen zeigen somit, dass der Tübbingring standsicher ist.

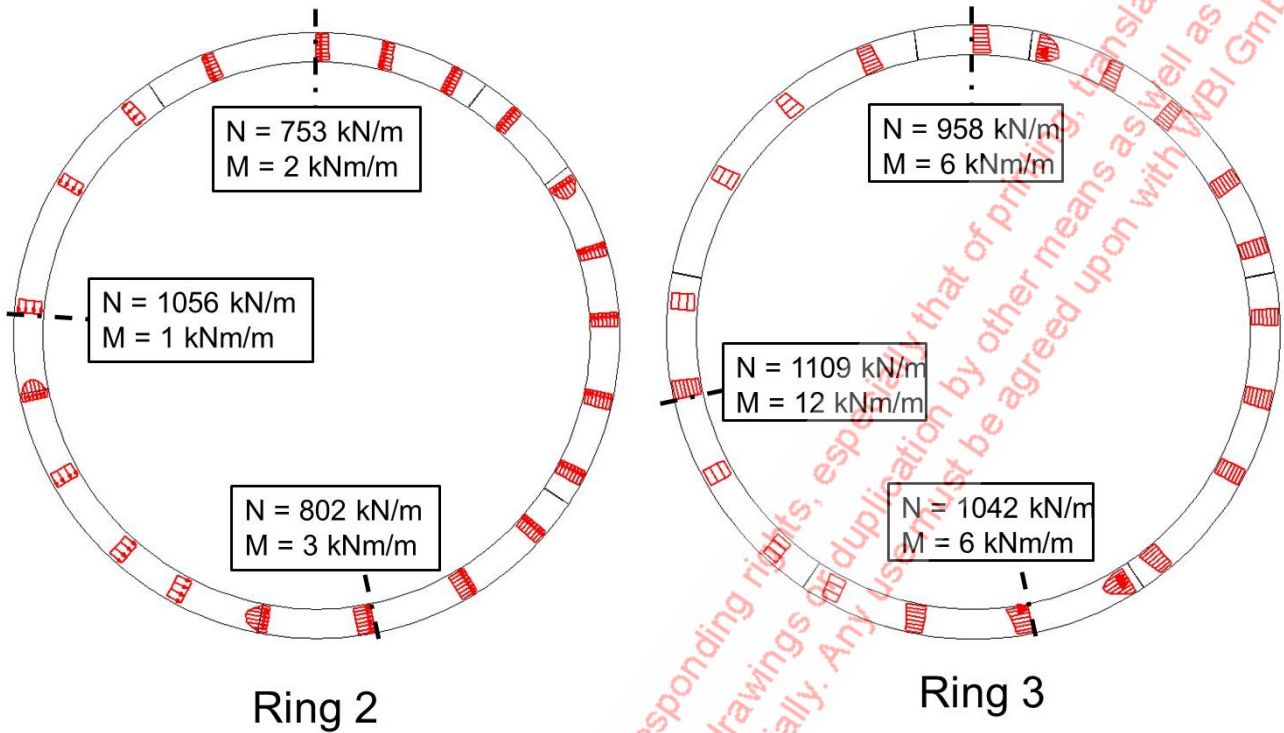


Bild 15: Fall A, Normalspannungen in den Tübbingringen 2 und 3, Rechenschritt 4

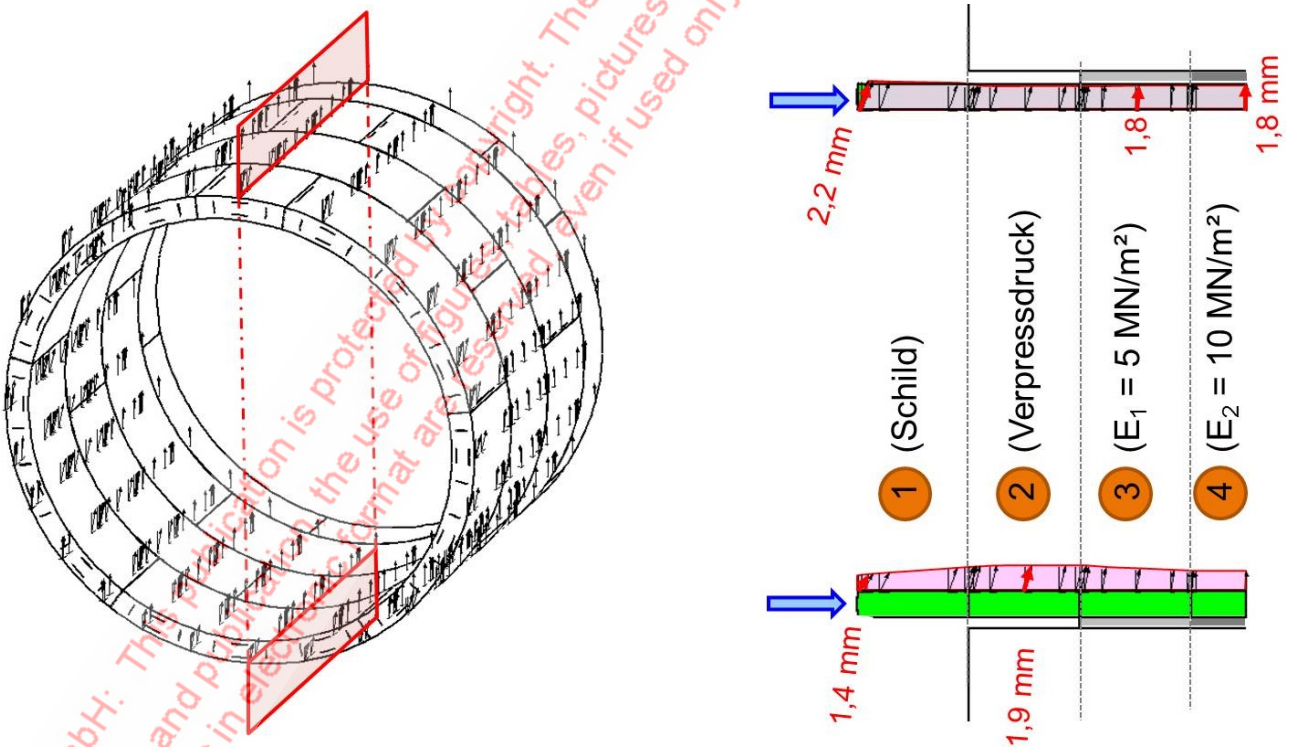


Bild 16: Fall A, Verschiebungen infolge Einbau Ringe 1 und 2 und Mörtelverpressdruck auf Ring 2 (Rechenschritte 4-3)

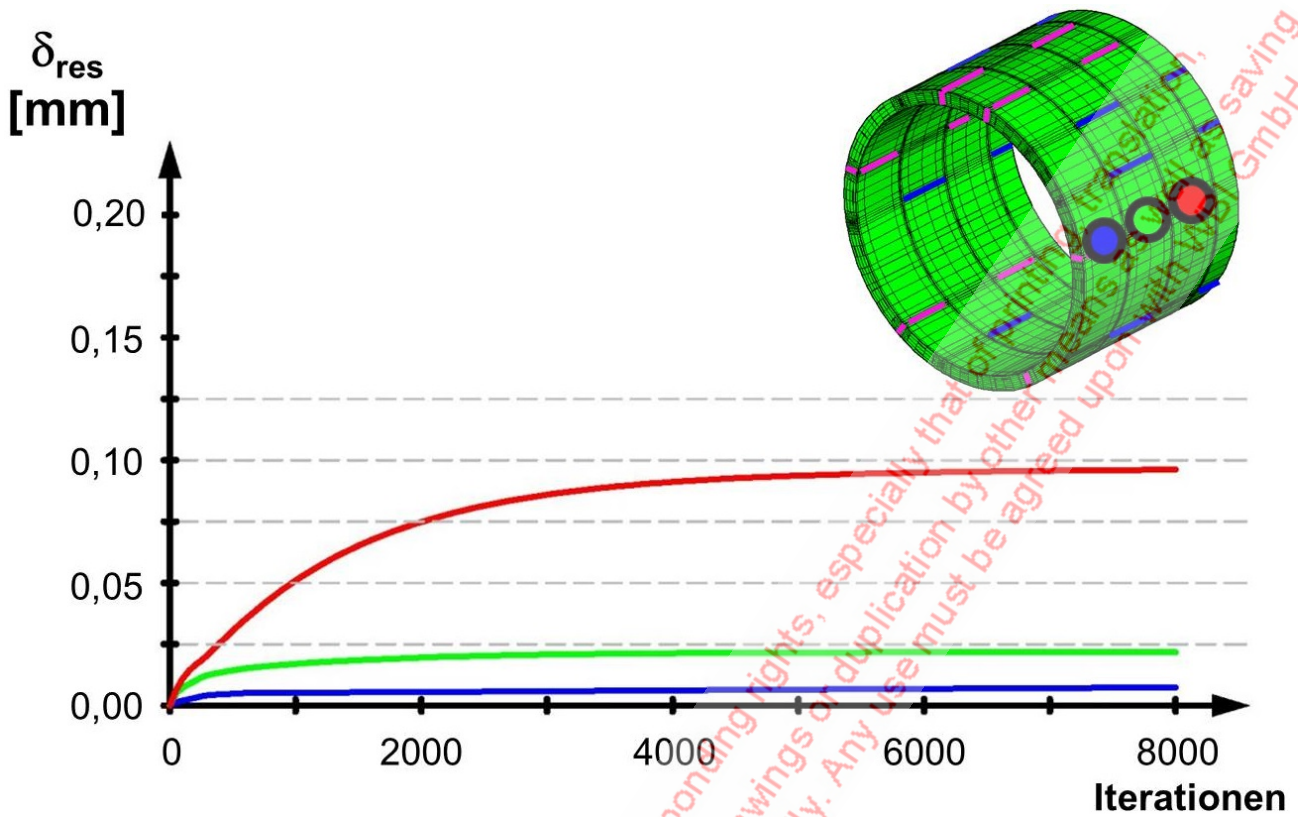


Bild 17: Fall A, viskoplastische Verschiebungen ausgewählter Punkte im Verlauf der Iterationsrechnung, Rechenschritt 4

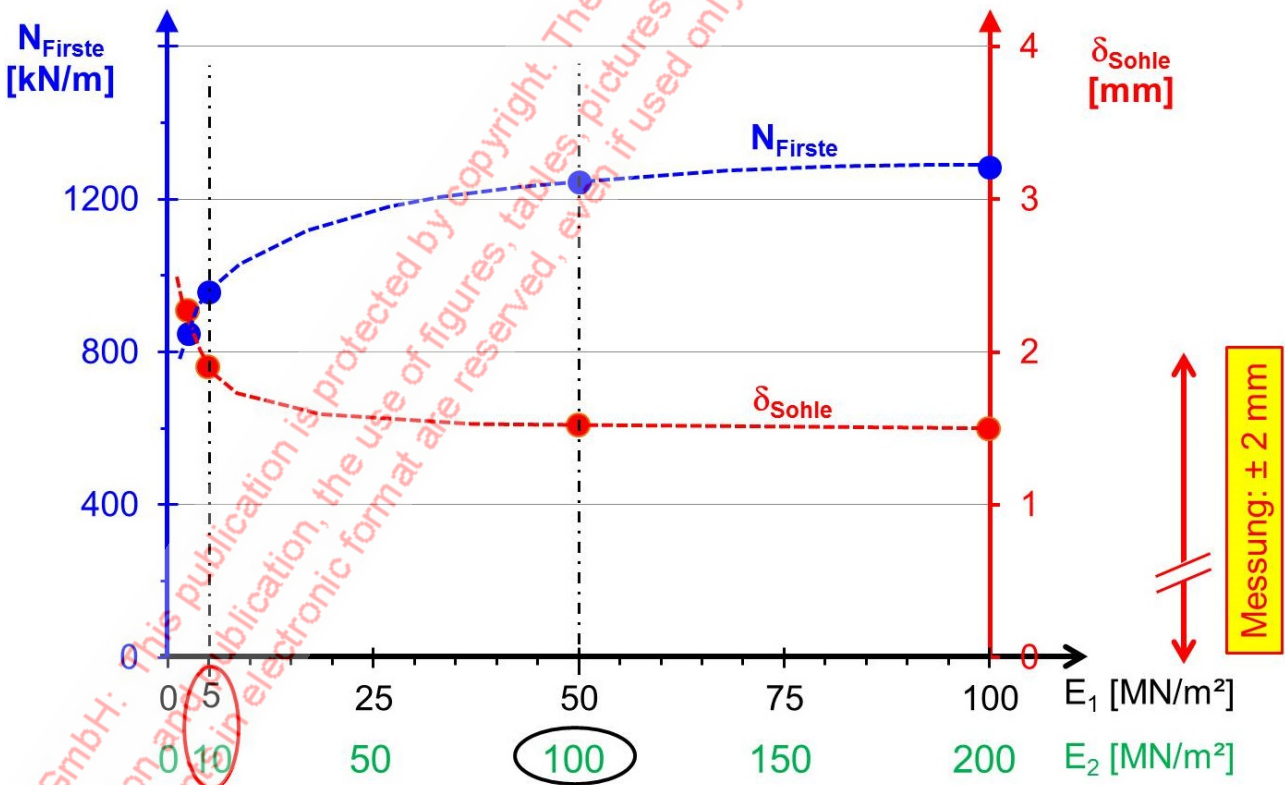


Bild 18: Einfluss $E_{M\ddot{o}rte}l$ auf Normalkräfte und Sohlverschiebung

Die Ergebnisse können durch die angenommene Vortriebspressekraft, den Mörtelverpressdruck und die Steifigkeit des Ringspaltmörtels beeinflusst werden. Im Rahmen der vorliegenden Veröffentlichung soll nur der Einfluss des E-Moduls des Ringspaltmörtels auf die Verformung und Beanspruchung der Tübbingröhre untersucht werden. Dazu sind in Bild 18 die Verschiebungen der Tübbingröhre im Bereich der Sohle und die Normalkraft im Bereich der Firste in Abhängigkeit vom angenommenen E-Modul des Ringspaltmörtels dargestellt. Es zeigt sich, dass die Normalkraft in der Firste mit steigendem E-Modul anwächst, 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 zu keiner Veränderung des Ergebnisses.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Durch Ödometerversuche, die im WBI-eigenen Labor durchgeführt wurden, kann 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. Der Mörtelverpressdruck muss über einen gewissen Zeitraum aufrechterhalten werden, um die Konsolidation des Mörtels zu ermöglichen.

Durch 3D-FE-Berechnungen kann gezeigt werden, dass die Normalkräfte in der Tübbingröhre mit größer werdendem E-Modul des Ringspaltmörtels größer werden, was im Hinblick auf eine spätere Biegebeanspruchung der Tübbingröhre durch den Bau der benachbarten zweiten Röhre günstig ist (vgl. Wittke & Wittke & Ashkenazi & Gang 2017). Auch die Verformung der Tübbingröhre kann durch einen höheren E-Modul des Mörtels günstig beeinflusst werden. Allerdings muss der E-Modul des Mörtels nicht größer sein als der des umgebenden Baugrunds. Im vorliegenden Fall konnte gezeigt werden, dass auch der aus den Laborversuchen abgeleitete E-Modul von 5 MN/m^2 für die Bemessung der Tübbingröhre ausreichend groß ist.

Literatur

Wittke, M.; Wittke, W.; Ashkenazi, S.; Gang, J.: Entwurf der Tunnel für die Red Line der Stadtbahn von Tel Aviv, Israel. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017.

Thewes, M.; Budach, C.: Mörtel im Tunnelbau - Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen zur Verfüllung des Ringspaltes bei Tunnelvortriebsmaschinen, BauPortal 12/2009.