

# Großquerschnitte im Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd, Statische Berechnungen, Senkungsprognosen und Baubetriebliche Aspekte

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Dr.-Ing. Martin Wittke, Dipl.-Ing. Ralf Druffel

Dipl.-Ing. Andreas Rath

Dipl.-Ing. Günter Osthoff

## Zusammenfassung

Für den Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd des Projekts Stuttgart 21 im PFA 1.2 müssen zwei zweigleisige Tunnelröhren mit einer Länge von 224 m bzw. 230 m aufgefahren werden. Die Tunnel besitzen einen bis zu 20,0 m breiten und 15,6 m hohen Ausbruchquerschnitt und werden auf nahezu der gesamten Länge im Vollausbuch mit einer abgetreppten Ortsbrust aufgefahren. Die Sicherung der Tunnellaibung erfolgt mit stahlfaserbewehrtem Spritzbeton. Als vorauseilende Sicherung wird ein Rohrschirm verwendet, der zur Begrenzung der Ausbruchs- und Arbeitshöhe aus dem Querschnitt heraus gebohrt wird. Die Ortsbrust wird durch ca. 140 bis 200 Stück (Raster 1 m x 1 m), 16 m lange Anker gesichert.

Die Vortriebe verlaufen unter Bebauung. Die Überlagerung nimmt vom Verzweigungsbauwerk Hbf. Süd zum Hauptbahnhof von ca. 45 m auf ca. 7 m ab. Über ca. zwei Drittel der Strecke wurden bzw. werden vor dem Tunnelvortrieb Hebungsinjektionen bzw. Kompensationsinjektionen durchgeführt.

Die Vortriebe werden durch ein umfangreiches Monitoring begleitet. Außer der Verformung der Spritzbetonschale wird die Verformung des Gebirges vor der Ortsbrust über Magnetostruktive Extensometer (Gleitmikrometer) überwacht. Die Verschiebungen im Baugrund werden außerdem über Extensometermessquerschnitte überwacht. Die Verschiebungen an der Geländeoberfläche werden geodätisch und über Schlauchwaagen gemessen.

In dem Beitrag werden die Planung und die statischen Berechnungen vorgestellt, und es wird über die Bauausführung berichtet. Ein Vergleich zwischen den prognostizierten Verschiebungen und den gemessenen Verschiebungen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

## 1. Einleitung

Die Vortriebe der Großquerschnitte im Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd des Projekts Stuttgart 21 stellen sowohl im Hinblick auf die Entwurfsbearbeitung als auch hinsichtlich der Bauausführung eine große Herausforderung dar. Der folgende Beitrag gibt einen Einblick in die Planung und die ersten Erfahrungen, die beim Bau gesammelt wurden.

## 2. Bauwerk und Baugrund

Die beiden in Bild 1 im Grundriss dargestellten Tunnelröhren verbinden den neuen Hauptbahnhof mit dem Verzweigungsbauwerk, von dem die zwei Tunnelröhren zur Filderebene und die zwei Röhren nach Ober- und Untertürkheim abzweigen.



Bild 1: Anfahrbereich HBF Süd, Lageplan

Dieser sogenannte Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd wird von der Rettungszufahrt aus in Richtung Hauptbahnhof aufgefahren. Die Rettungszufahrt beginnt unmittelbar nördlich des Portals des bestehenden Wagenburgtunnels und verläuft unter der Schützenstraße bis unter die Jugendherberge der Stadt Stuttgart. Der unter der Jugendherberge liegende Stollenabschnitt der Rettungszufahrt ist Teil des Verzweigungsbauwerks. Von hier aus werden die o. g. Röhren mit Hilfe von Pfeilerstollen aufgefahren. Im Anschluss an die Pfeilerstollen wird ein 16 m langer Abschnitt des Großquerschnitts in Richtung Hauptbahnhof im Ulmenstollenvortrieb aufgefahren. An diese Ulmenstollenvortriebe schließen sich die beiden Vortriebe 815 und 825 an, die im Vollausbuch mit einer abgetreppten Ortsbrust aufgefahren werden. Es handelt sich dabei um zwei ca. 207 m und 218 m lange Tunnelröhren mit Maulprofil und einer Ausbruchsbreite von 15,4 bis 20,0 m (Bild 1). Die Höhe der Querschnitte liegt zwischen 14,2 m und 15,6 m (Bild 2). Die Breite des Gebirgpfeilers zwischen beiden Röhren nimmt von ca. 12 m bis zum Durchschlag am Hauptbahnhof auf ca. 6 m ab (Bild 1). Die Röhren liegen unter der Bebauung des Kerner Viertels und besitzen am Hauptbahnhof eine Überdeckung von ca. 7 m, die bis zum Verzweigungsbauwerk auf ca. 45 m anwächst (Bilder 1 und 2). Im Bereich der Kernerstraße besitzt die Weströhre eine Überdeckung von ca. 41 m.

Beide Röhren kommen in den Schichten des ausgelaugten Gipskeupers zu liegen. Die Gebäude des Kerner Viertels sind in dem darüber liegenden Hangschutt gegründet.

Zum Schutz der Gebäude gegen unzulässige Senkungen und Senkungsunterschiede wurden Hebungsinjektionen durchgeführt (Compensation-Grouting-Verfahren "CGV", Bild 3). Der Bereich, auf den sich die Hebungsinjektionen erstrecken, ist im Bild 3 gekennzeichnet. Von den CGV-Schächten 2 und 3 wurden zu diesem Zweck bis zu ca. 100 m lange Bohrungen ausgeführt und mit Manschettenrohren ausgerüstet.

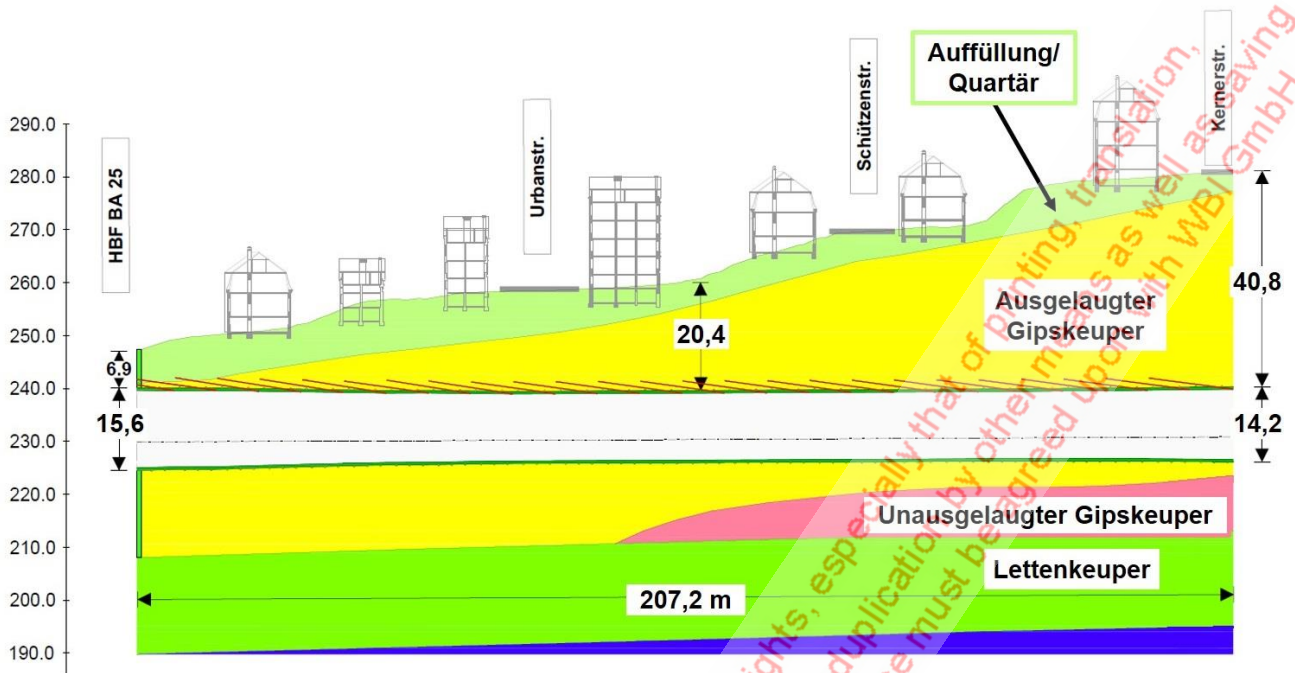


Bild 2: Weströhre (815), Längsschnitt

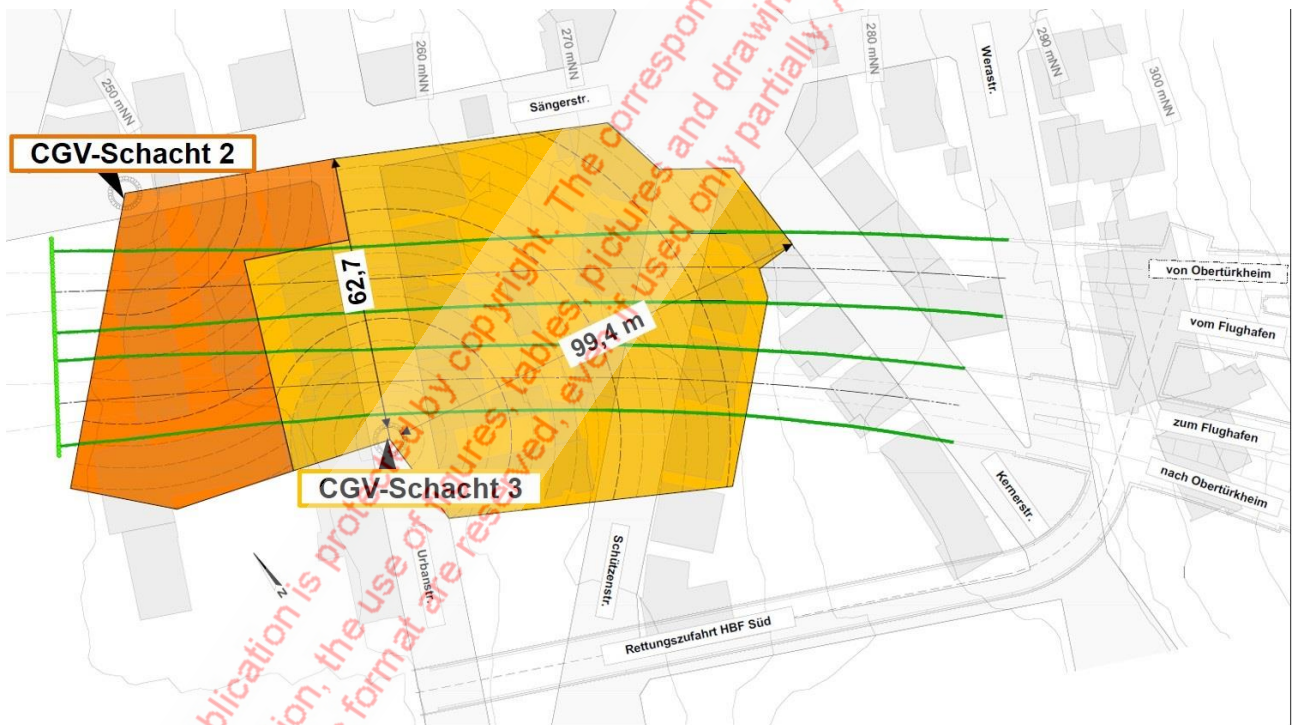


Bild 3: Lageplan mit CGV-Maßnahmen

### 3. Entwurf

Der Standsicherheitsnachweis für die Bauzustände wurde mit Hilfe von 2D- und 3D-FE-Berechnungen für vier Berechnungsquerschnitte geführt. Eine 3D-Berechnung ist im Hinblick auf die großen Überlagerungen, die vergleichsweise geringen Abstände beider Röhren und die Bebauung an der Geländeoberfläche erforderlich. Eines der verwendeten 3D-FE-Netze zeigt Bild 4. Die maßgebenden Kennwerte des ausgelaugten Gipskeupers sind der

E-Modul von  $E = 150 \text{ MPa}$  und die im Bild 4 dargestellten Scherparameter. Die Kennwerte des unterhalb der Röhren anstehenden unausgelaugten Gipskeupers sind von untergeordneter Bedeutung.

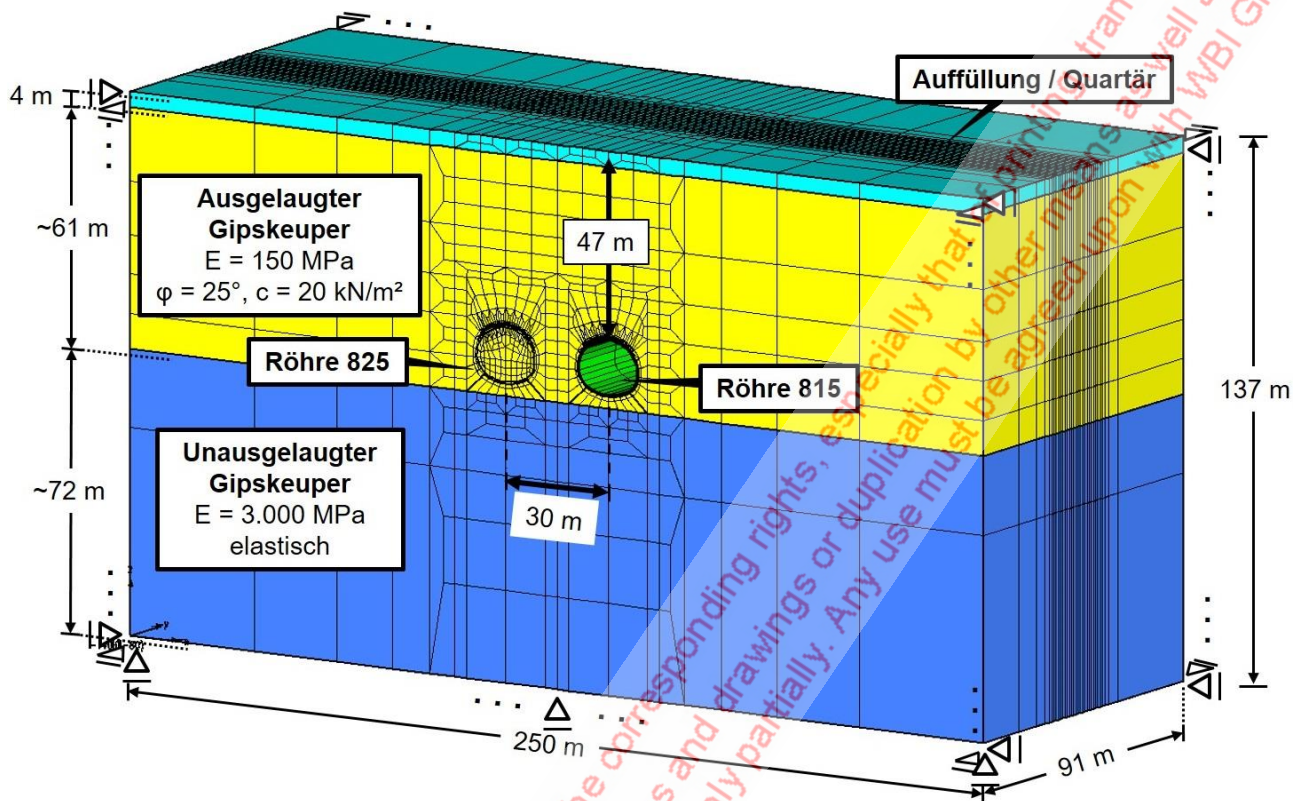


Bild 4: 3D-FE-Netz

In der Berechnung wurde ein Vollausbuch mit abgetrepter Ortsbrust simuliert. Die stahlfaserarmierte Spritzbetonschale wurde mit einer Dicke von 50 cm angenommen. Die Beanspruchung der Spritzbetonschale, die sich aus den Berechnungen ergibt, zeigt eine sehr große Normalkraft, die von der Firste zu den Ulmen hin zunimmt (Bild 5). In der Firste und an den Ulmen treten Biegemomente auf, die auf der Innenseite (Firste) und auf der Außenseite (Ulme) der Spritzbetonschale zu einer Zugbeanspruchung führen. Der Zug wird aufgrund der hohen Normalkräfte überdrückt. An den Ulmen führen diese Schnittgrößen zu einer Druckbewehrung die allerdings durch eine Verstärkung der Spritzbetonschale im Ulmenbereich auf 60 cm vermieden werden konnte.

Eine Besonderheit ist die Biegebeanspruchung der Spritzbetonschale im Firstbereich der Kalotte, die der Strosse und Sohle vorausleitet, da der Sohlschluss erst nach 5 m erfolgt (Bild 6). Die Kalotte hat in dem vergleichsweise stark verformbaren ausgelaugten Gipskeuper praktisch keine Auflagerung und trägt zumindest teilweise wie ein vertikal belasteter Kragarm. Dadurch entsteht auf der Außenseite der Schale in Längsrichtung eine Zugbeanspruchung und auf der Innenseite eine Druckbeanspruchung. Diese Biegebeanspruchung kann allerdings im vorliegenden Fall durch den stahlfaserbewehrten Spritzbeton aufgenommen werden (Bild 6).

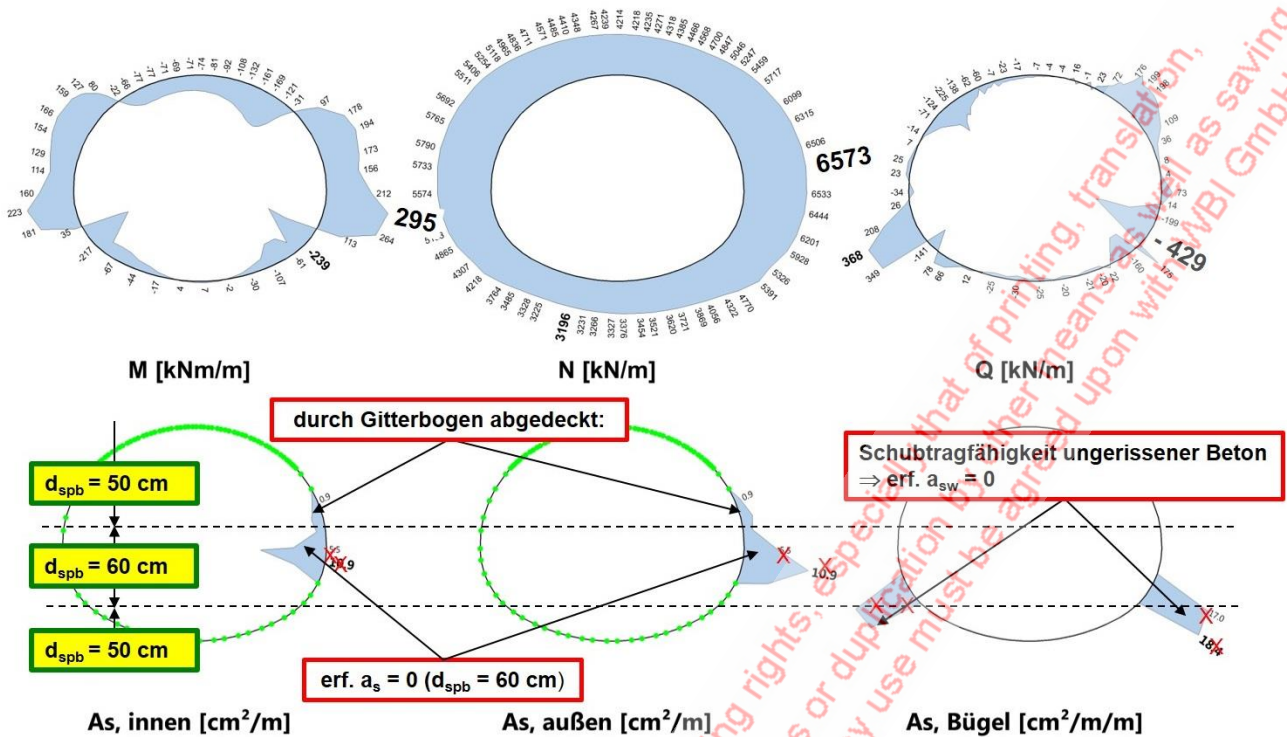


Bild 5: Spritzbetonschale 1. Röhre, Bemessung nach Auffahren 2. Röhre (mit Störung)

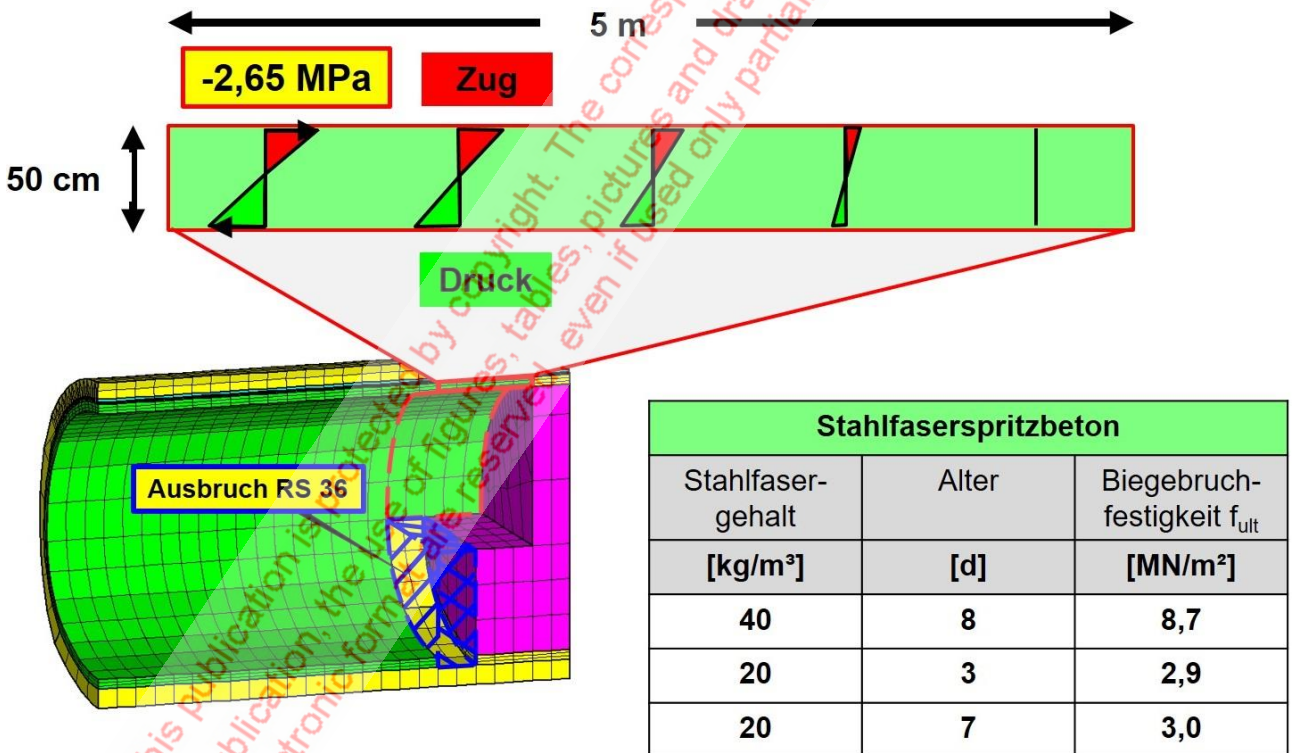


Bild 6: Bemessung Spritzbetonschale in Längsrichtung

Auf der Grundlage der Ergebnisse der statischen Nachweise wurde in enger Zusammenarbeit mit der DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH und der Arge ATCOST21 eine Vortriebsklasse erarbeitet, deren wesentliche Elemente im Bild 7 dargestellt sind. Die stahlfaserarmierte Spritzbetonschale ist danach - wie bereits erwähnt - 50 cm und in den Ulmen 60 cm dick. Eine vorausseilende Sicherung erfolgt über einen 16 m langen Bohrrohrschirm, der ohne

Aufweitung des Querschnitts zu einer Nische mit Hilfe von Bohrungen aus dem Querschnitt heraus hergestellt wird. Die ersten 3 bis 4 m der Rohre müssen dann im Zuge des Vortriebs wieder abgebrochen werden. Da die Rohrschirme in Abständen von 8 m hergestellt werden, ergibt sich eine ausreichende Überlappung (Bild 7). Die vertikale abgetreppte Ortsbrust wird mit 16 m langen Ortsbrustankern und stahlfaserbewehrtem Spritzbeton gesichert. Die Ortsbrustanker werden mit einer Überlappung von 8 m Abstand in einem Raster von 1 m x 1 m (R32S) und 1,2 m x 1,2 m (R51L) angeordnet. Die unterschiedlichen Durchmesser der Ortsbrustanker dienen der besseren Erkennbarkeit beim Vortrieb.

Außerdem wurde die Sohle im Vergleich zum ursprünglich geplanten Querschnitt stärker ausgerundet. Der Untergrund unterhalb der Sohle wurde darüber hinaus mit vorauseilenden 16 m langen Anker gesichert. Zusätzlich wurden in den Ulmen Radialanker angeordnet (Bild 7).

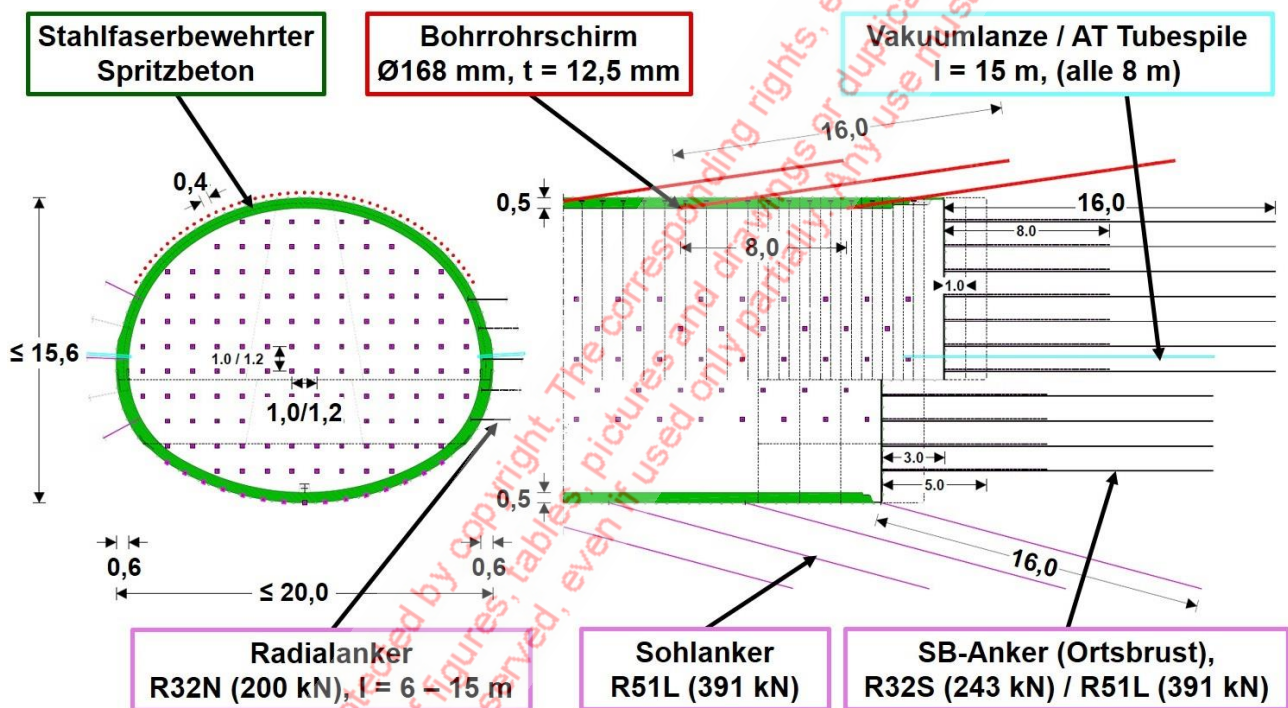


Bild 7: Vortriebsklasse

#### 4. Bauausführung und Messungen

Auf dem Bild 8 ist der Bohrwagen beim Herstellen eines Rohrschirms erkennbar. Im Vordergrund sieht man die bereits hergestellte Stahlbetoninnenschale im Verzweigungsbauwerk. Der vertikale Stahlbetonpfeiler, der die beiden eingleisigen Röhren voneinander trennt, ist auf der rechten Seite des Bildes zu erkennen. Die Herstellung der Ortsbrustanker sieht man in Bild 9.

Die Bauausführung wird durch ein umfangreiches Messprogramm begleitet. Die im Bild 10 in Rot gekennzeichneten Höhenmesspunkte liegen im Anfahrbereich auf Straßen, Stützmauern und an Gebäuden in Höhe der Geländeoberfläche. Die Grün markierten Punkte repräsentieren Schlauchwaagen, mit denen die Hebungen und Senkungen in den Kellern

der Gebäude im Bereich des Hebungsfeldes gemessen wurden (Bild 10). Außerdem wurden Extensometer installiert, mit denen die Verschiebungen im Baugrund überwacht wurden. Bild 10 zeigt darüber hinaus die Senkungen, die sich nach dem Vortrieb der ersten 48 m der südwestlichen Röhre 815 des Großquerschnitts ergeben haben. Danach betragen die Senkungen der Geländeoberfläche 16 bis 22 mm. Die Gebäude im Vortriebsbereich haben sich dagegen um ca. 30 mm gesenkt, wie die violetten Zahlen im Bild 10 zeigen, die die Ergebnisse der terrestrischen Höhenmessungen wiedergeben. Der Grund für die größeren Senkungen der Gebäude ist in der Gründung unterhalb der Geländeoberfläche und der dadurch bedingten größeren Nähe zum Tunnel zu sehen.

Zum Vergleich sind im Bild 11 die rechnerischen ermittelten Verschiebungen dargestellt. Für die Geländeoberfläche ergeben sich danach 22 bis 26 mm und in Höhe der Gründungsebene der Gebäude 26 bis 30 mm Verschiebungen. Das sind Werte, die gut mit den Messergebnissen übereinstimmen.

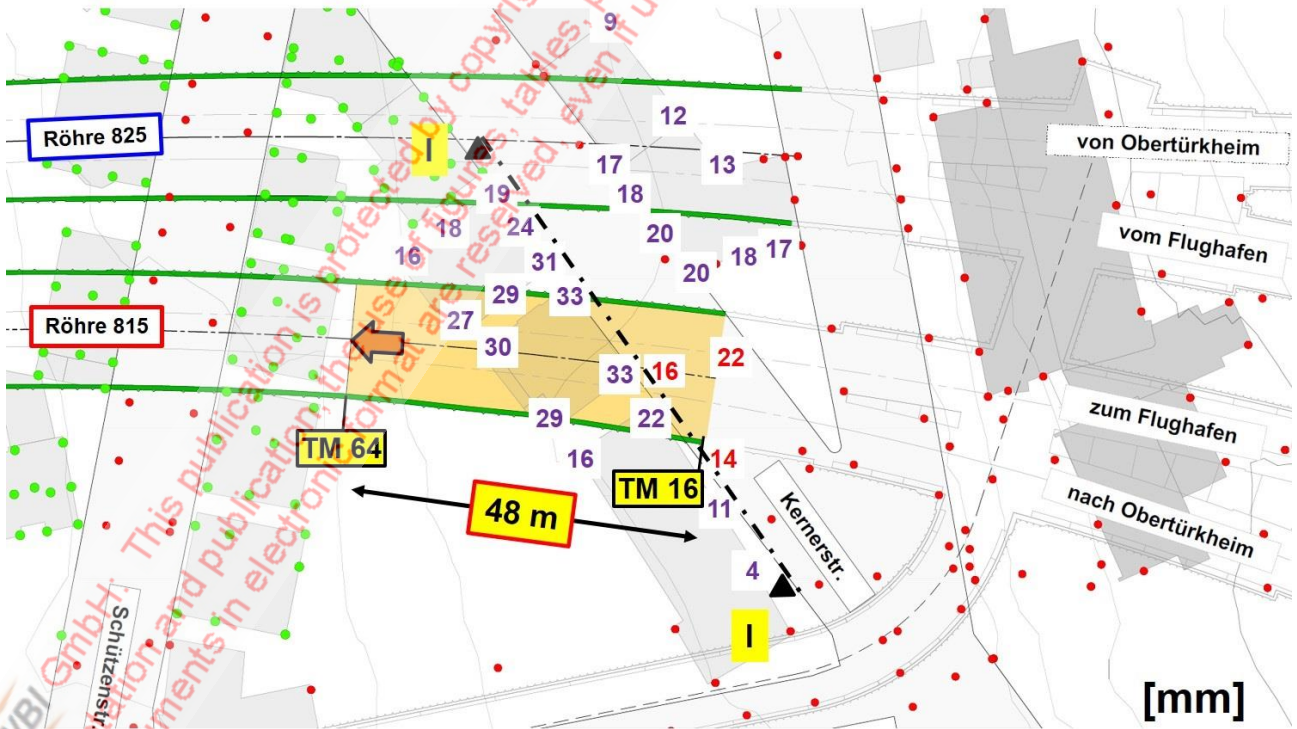


Bild 8: Herstellung Rohrschirm

Auch die im Tunnel gemessenen Firstsenkungen, die in diesem Abschnitt ca. 30 bis 40 mm betragen, stimmen gut mit den Rechenergebnissen überein, wenn man berücksichtigt, dass von den rechnerisch ermittelten Firstsenkungen von 73 mm ca. 30 - 40 mm messbar sind (Bild 11).



Bild 9: Herstellung Ortsbrustanker



© Bild 10: Vollausbuch Röhre 815 und Senkungen TM 16 bis TM 64



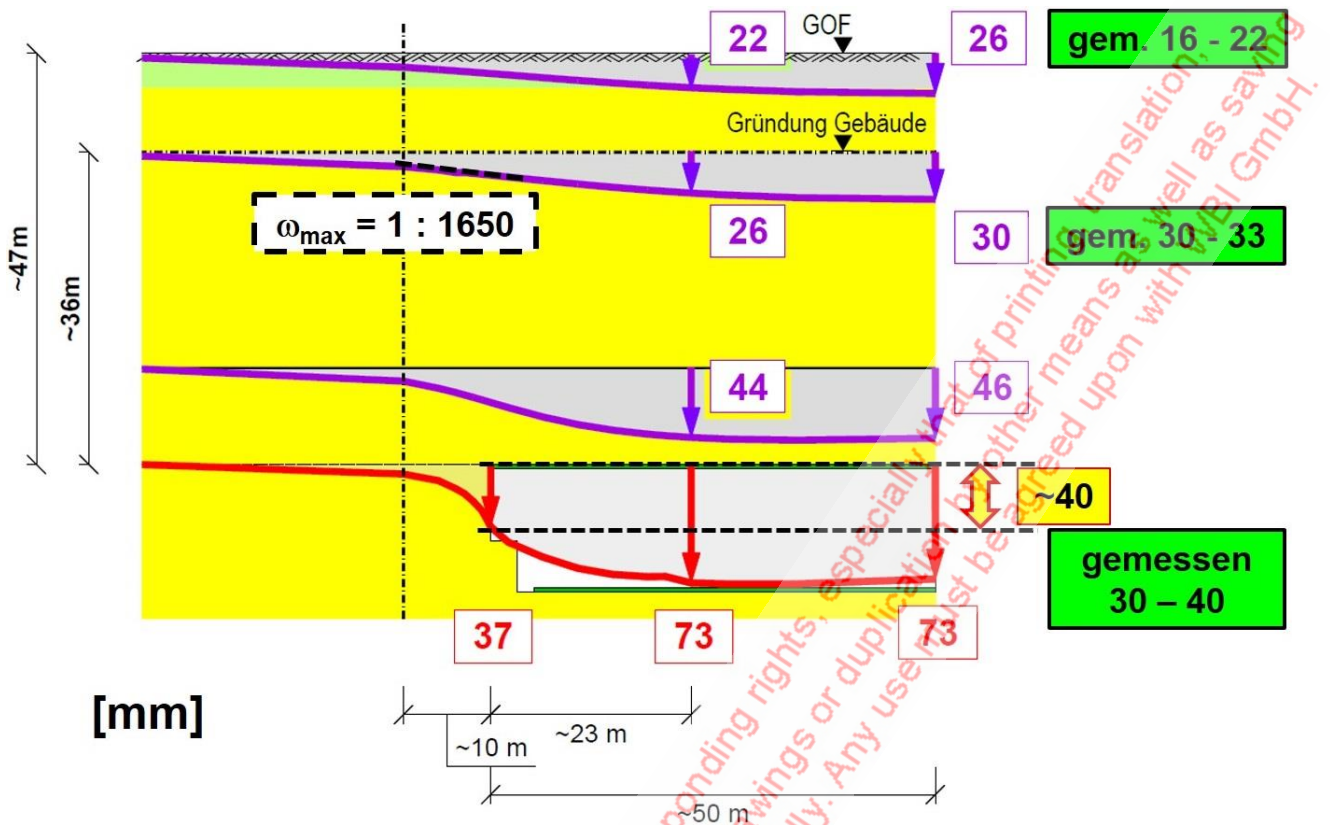


Bild 11: Errechnete Senkungen, Vortrieb 1. Röhre, Längsschnitt

Um die Standsicherheit der Ortsbrust zu überwachen, wurde auf Vorschlag des EBA-Prüfers ein vorauseilender Gleitmikrometer eingebaut, mit dem die horizontalen Verschiebungen der Ortsbrust und des vor der Ortsbrust liegenden Baugrunds gemessen wurden. Als Gleitmikrometer wurde ein Magnetostriktives Extensometer vorgesehen. Hierbei wird in einem Bohrloch ein Rohr mit eingelagerten Magneten eingebaut und der Ringraum mit Mörtel verfüllt. Während des Vortriebs werden die Längsverschiebungen mit einem Sensor gemessen, der in das Rohr eingeführt wird. Die Messergebnisse für eine größere Zahl von Bauzuständen sind in Bild 12 dargestellt. Man erkennt, dass sich der Baugrund in einem Abstand von  $> 2$  m vor der Ortsbrust nur sehr wenig verschiebt. Das ist ein positives Ergebnis der starken Ortsbrustsicherung. Die in der Statik prognostizierten Verschiebungen sind etwas größer, liegen jedoch in der gleichen Größenordnung wie die Messergebnisse (Bild 12).

Bild 13 zeigt eindrucksvoll die Größe des Querschnitts und die vertikale mit Spritzbeton und Ankern gesicherte Ortsbrust.

Abschließend sollen die Hebungen und Senkungen des Gebäudes in der Schützenstraße 10 vor und nach der Unterfahrung mit der Röhre 815 erläutert werden (Bild 14).

Bild 15 zeigt dazu die durch die Injektionen bewirkten Vorhebungen des Gebäudes und deren zeitlichen Verlauf. Danach wurde das Gebäude um 13 bis 21 mm angehoben. Außerdem sind die Vortriebsstände der Röhren 815 und 825 über die Zeit dargestellt.

Im Verlauf der Unterfahrung stellen sich dann vortriebsbedingte Senkungen von ca. 25 mm ein. Diese führen dazu, dass das Gebäude nach der Unterfahrung Senkungen bis zu 10 mm erfährt (Bilder 15 und 16).

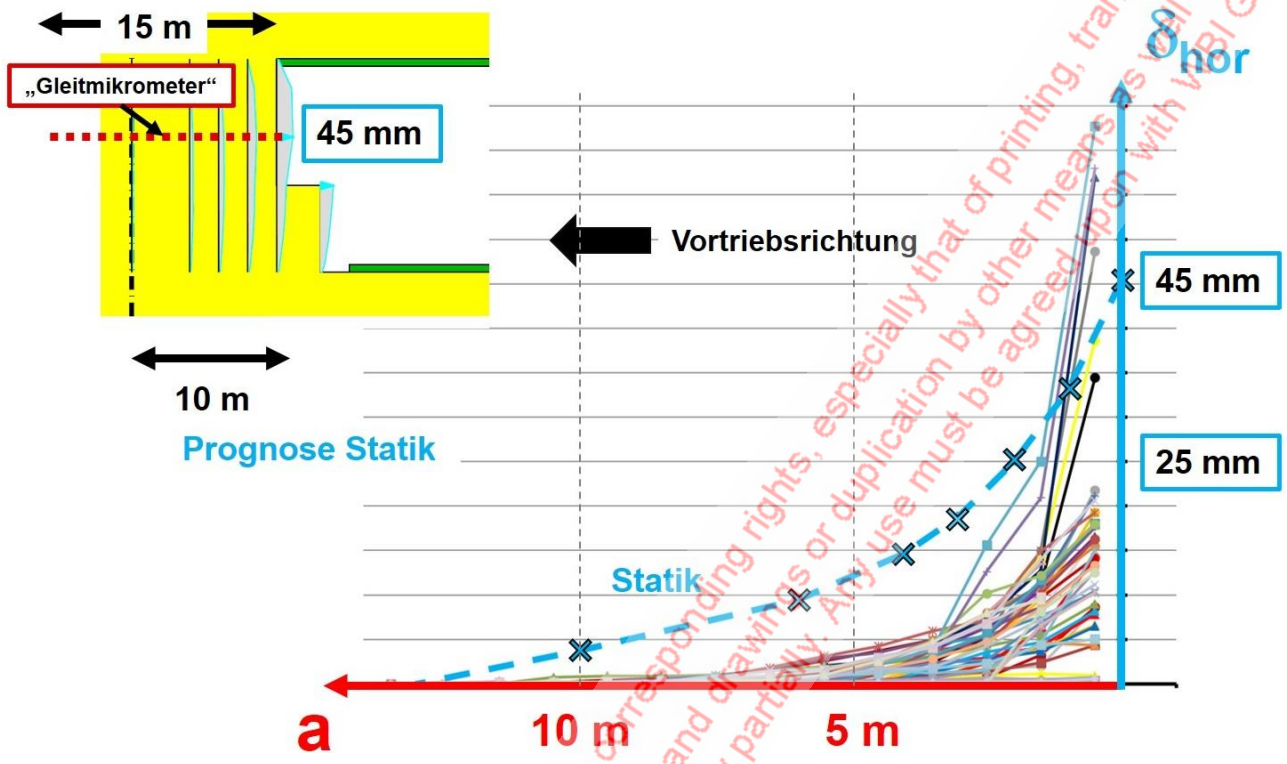


Bild 12: Verschiebung Ortsbrust, Vergleich Messung - Rechnung

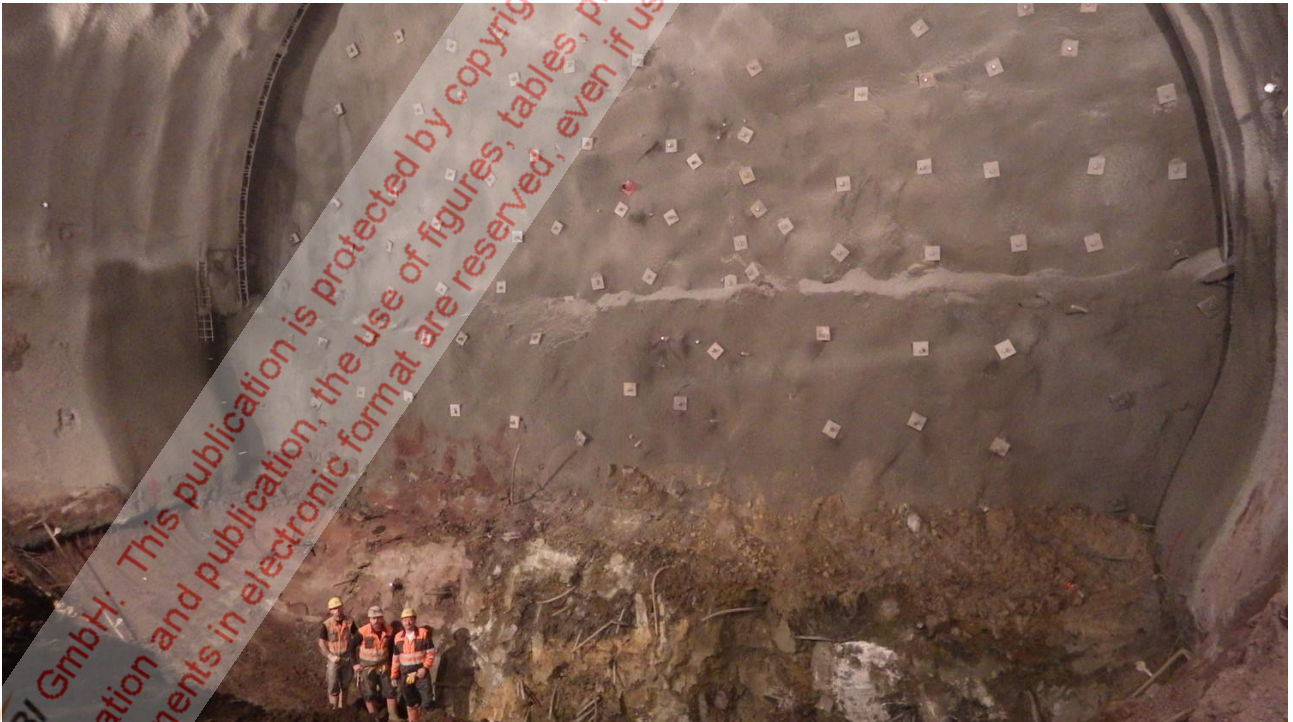


Bild 13: Sohlaushub

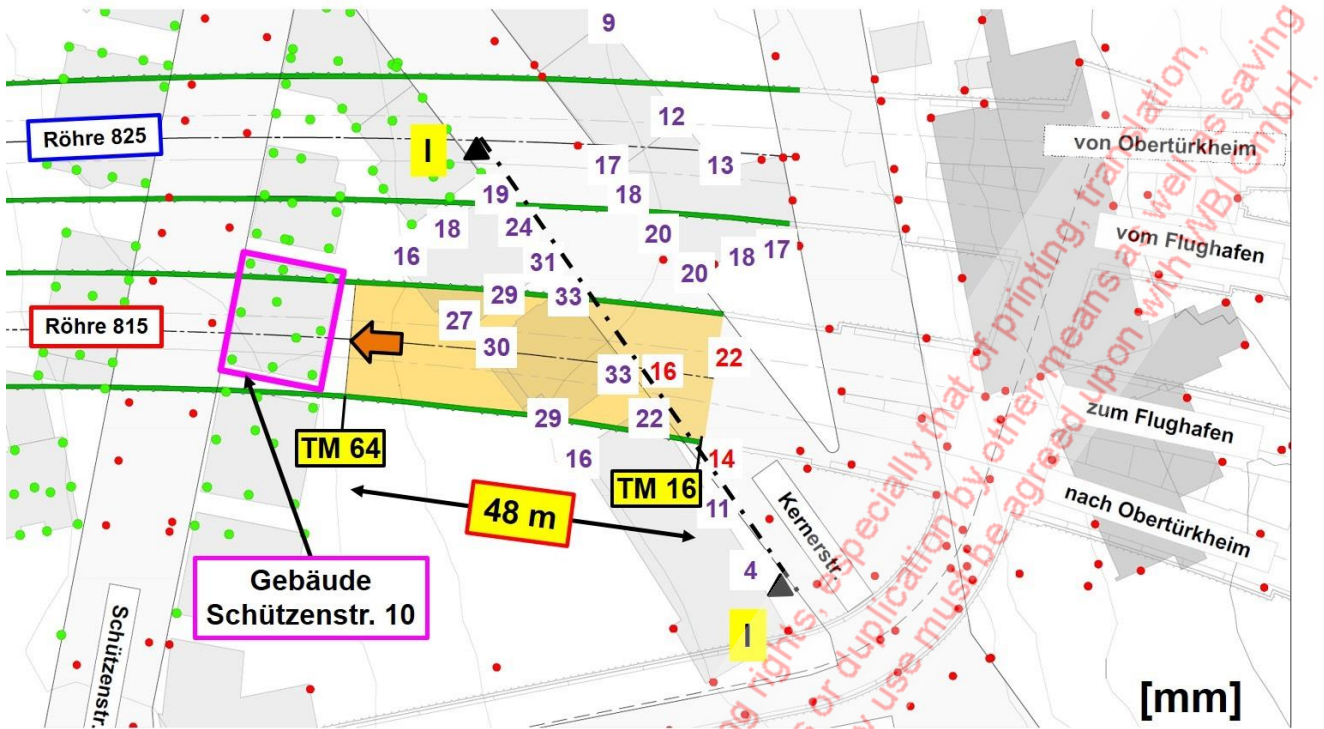


Bild 14: Vollausbuch Röhre 815 und Senkungen, TM 16 bis TM 64

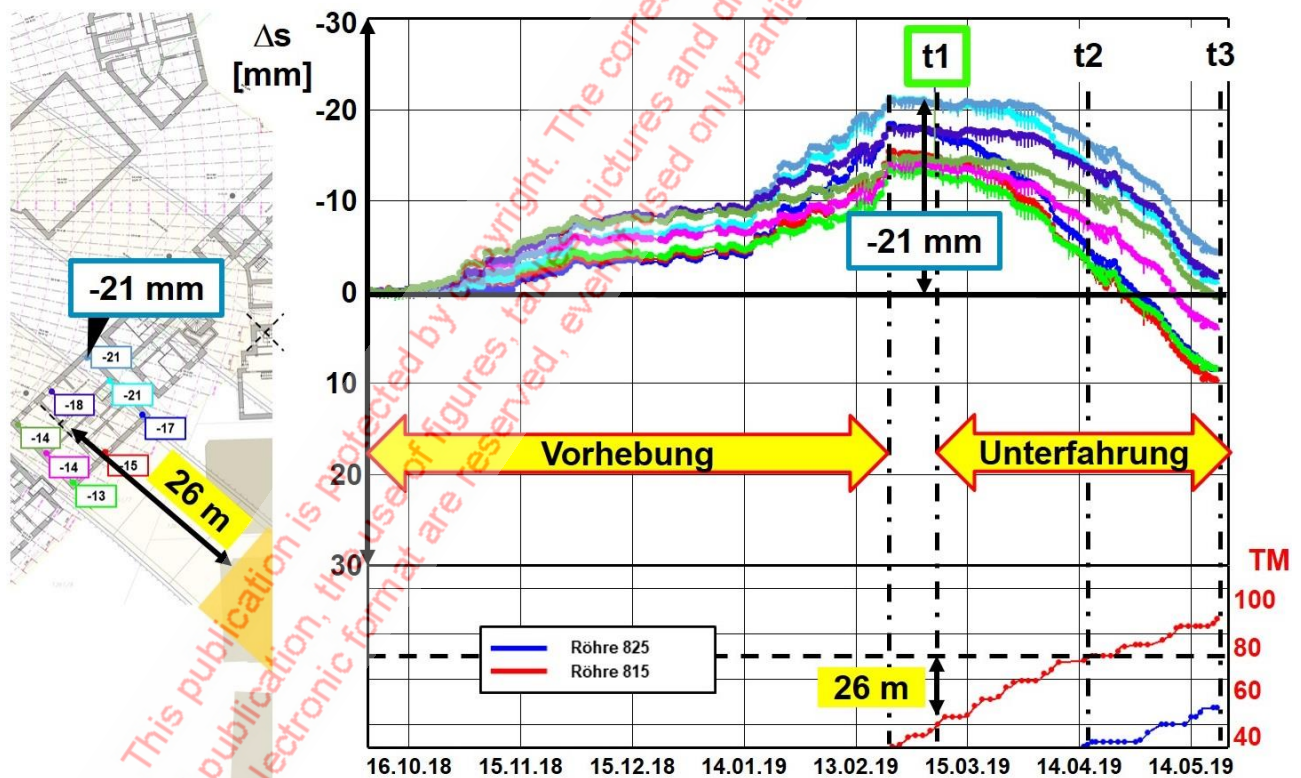


Bild 15: Röhre 815: Unterfahrung Gebäude Schützenstraße 10

Bild 17 zeigt einen Schnitt entlang der Straßenseite der Gebäude der Schützenstraße 8 bis 14 mit den Ergebnissen der Schlauchwagenmessungen nach der Unterfahrung mit der Röhre 815. Man erkennt, dass die Schützenstraße 10 - wie bereits vorher dargestellt - nach

der Unterfahrung entlang dieses Schnitts praktisch wieder die Ausgangslage erreicht hat. Dagegen weisen die Gebäude oberhalb der Röhre 825 noch eine Vorhebung bis zu 16 mm aus.

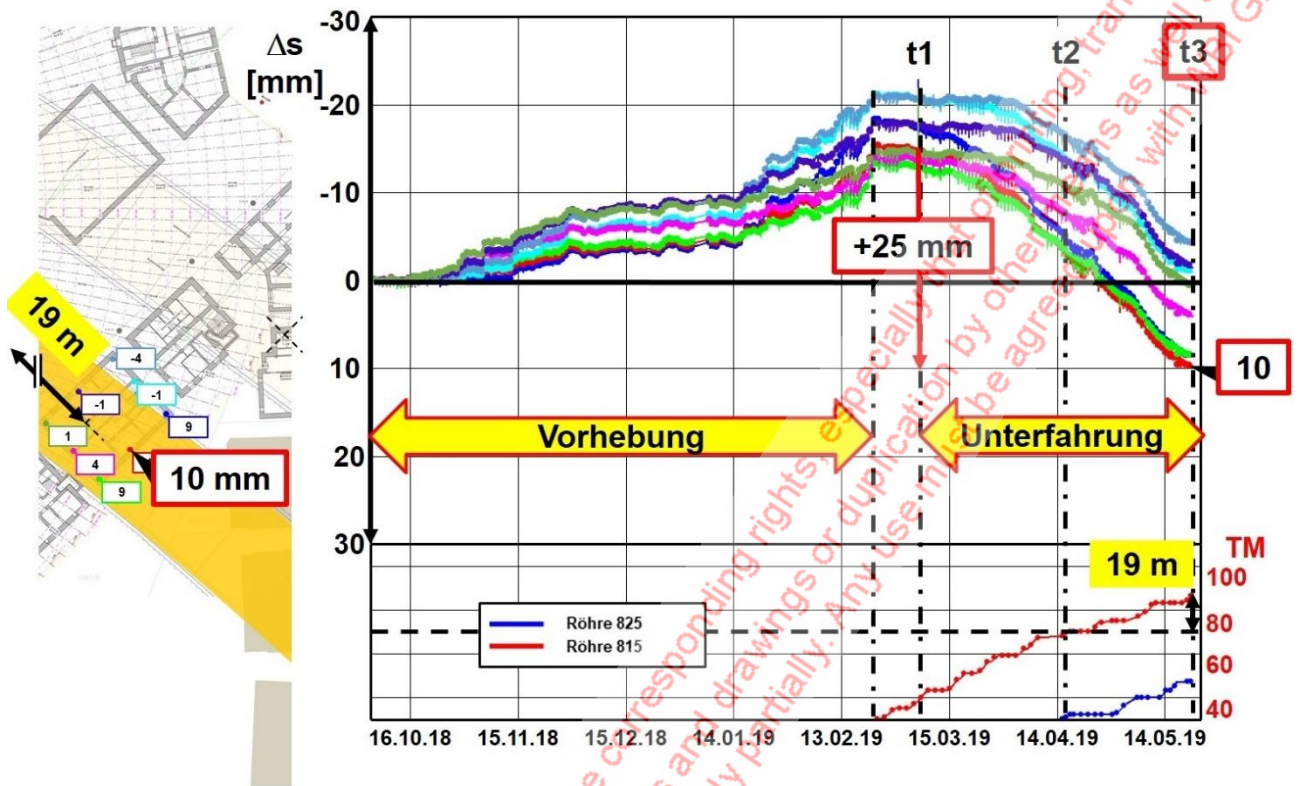


Bild 16: Röhre 815: Unterfahrung Gebäude Schützenstraße 10

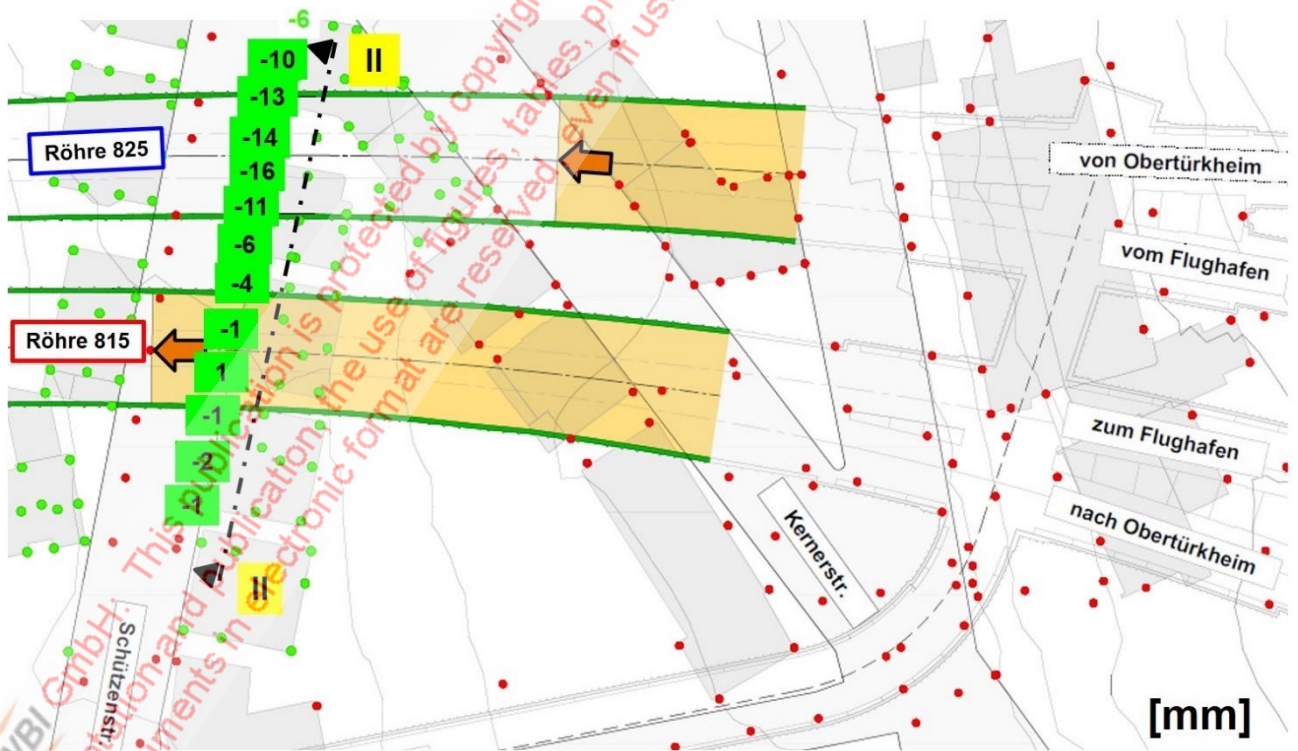


Bild 17: Vortrieb Röhre 815: Senkungen Schützenstraße 8 bis 14 (Stand 21.05.2019)

Der in Bild 18 dargestellte Vergleich der vortriebsbedingten Senkungen entlang des o. g. Schnitts II-II mit den Ergebnissen der FE-Berechnung zeigt, dass die Messergebnisse für diese Gebäude etwas günstiger sind als die Prognose.

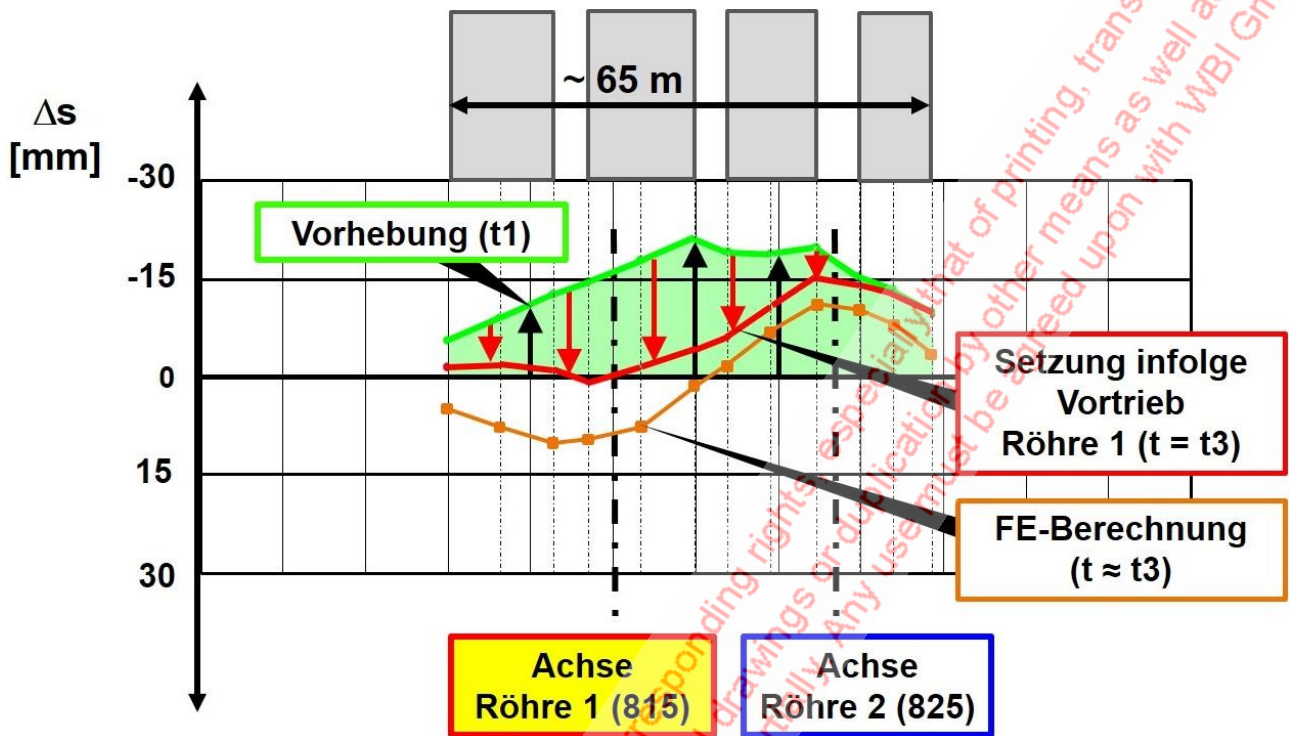


Bild 18: Röhre 815: Unterfahrung Gebäude Schützenstraße 8 bis 14, Schnitt II-II - Vertikalverschiebungen

Aus dem Bauzeitdiagramm in Bild 19 ergibt sich eine mittlere Vortriebsleistung von 0,6 m/d.

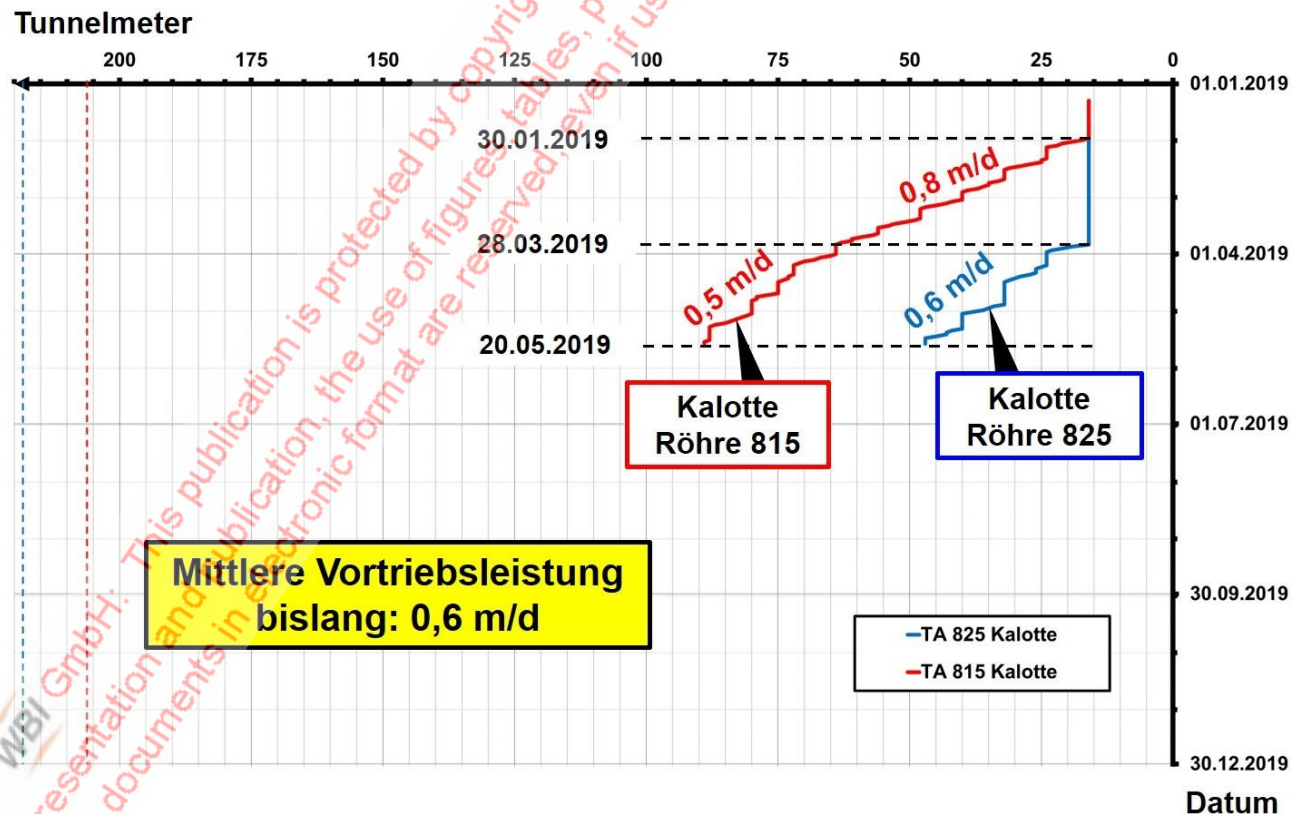


Bild 19: Bauzeitdiagramm

Wir bedanken uns beim Leser für das Interesse und werden auf dem nächsten Felsmechanik- und Tunnelbautag über die Ergebnisse und Erfahrungen berichten, die wir im weiteren Verlauf der Arbeiten sammeln werden (Bild 20).



Bild 20: Glück Auf und Vielen Dank