

## **Konventionelle Vortriebe im ausgelaugten Gipskeuper**

### **Excavation of tunnels in unleached Gypsum Keuper by conventional means**

**Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann,  
Dipl.-Ing. Jochen Lutz, Dipl.-Ing. Wadim Strangfeld**

#### **Zusammenfassung**

In der Zwischenzeit sind für das Projekt Stuttgart 21 insgesamt ca. 1.800 m Tunnel im ausgelaugten Gipskeuper aufgeföhren worden. Bei Überdeckungen von wenigen Metern bis ca. 50 m wurden dabei Gebäude, Brücken und Straßen unterfahren.

Für die Unterföhren der Gebäude Presselstraße 10 und 12 waren ursprünglich Hebungsinjektionen zum Ausgleich vortriebsbedingter Senkungen vorgesehen. Durch Messungen und Beobachtungen in den Zufahrtstrecken der Tunnelröhren und durch 3D-FE-Berechnungen mit dem Programmsystem FEST03 konnte allerdings gezeigt werden, dass eine Unterföhren der Gebäude ohne Hebungsinjektionen möglich ist, wenn für die Schichten des ausgelaugten Gipskeupers die charakteristischen Kennwerte angenommen werden können und Maßnahmen zur Minimierung von Senkungen ergriffen werden. Inzwischen sind die Bauwerke erfolgreich ohne Hebungsinjektionen unterfahren worden.

Die Rettungszufahrt Hbf. Süd und das Verzweigungsbauwerk, von dem die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim aus dem Fildertunnel abzweigen, liegen ebenfalls - zumindest abschnittsweise - in den Schichten des ausgelaugten Gipskeupers. Auch für dieses Bauwerk wurden 3D-Prognoserechnungen durchgeführt.

#### **Executive Summary**

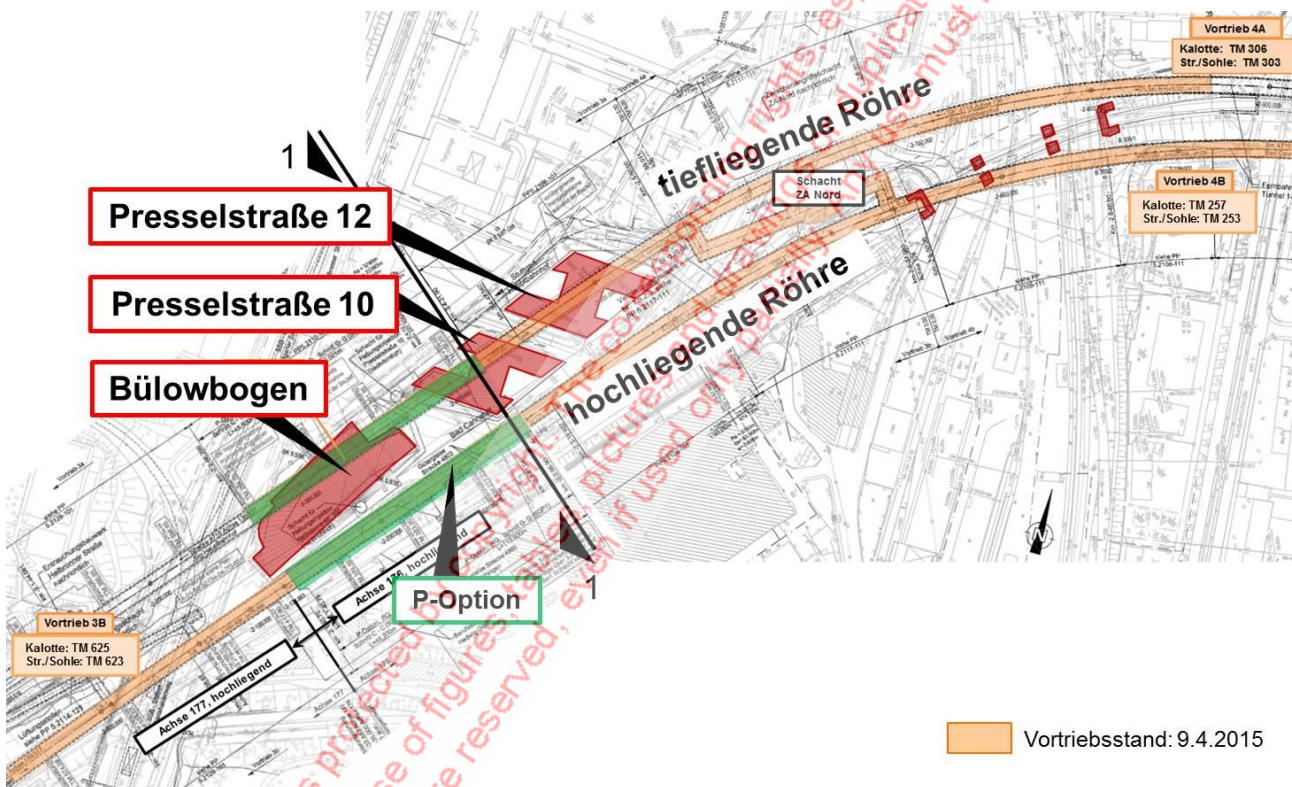
In the meantime, approximately 1800 m of tunnels located in leached Gypsum Keuper have been excavated in connection with the large-scale railway project Stuttgart – Ulm. Buildings, bridges and roads have been underpassed. The heights of overburden varied between a few meters only and up to 50 m.

For underpassing the buildings Presselstraße 10 and 12, originally, compensation grouting was planned. By means of monitoring and observation in the adjacent tunnel section and by means of 3D-FE-analyses it was shown that undercrossing of these buildings without compensation grouting is feasible, if the characteristic geotechnical parameters are assumed and additional design measures to minimize subsidence are taken. Meanwhile these buildings have been successfully underpassed without compensation grouting.

The rescue adit "Central Station South" and the branching structure for the tunnels towards Ober-/Untertürkheim and the Fildertunnel, respectively, are also mainly located in the layers of the leached Gypsum Keuper. Also here, 3D-FE-analyses for prediction of the subsidence have been carried out.

## 1. Einleitung

In der Zwischenzeit sind für das Projekt Stuttgart 21 insgesamt ca. 1.800 m Tunnel im ausgelaugten Gipskeuper aufgeföhren worden. Bei Überdeckungen von wenigen Metern bis ca. 50 m wurden dabei Gebäude, Brücken und Straßen unterfahren. Unter anderem unterfährt die tief liegende Röhre des Tunnels nach Bad Cannstatt die Gebäude der Presselstraße 10 und 12 und den Bülowbogen (Bild 1 und Bild 2). Die hoch liegende Röhre verläuft unmittelbar neben diesen Gebäuden und beeinflusst ebenfalls die Senkungen (Bild 3). Wegen der sogenannten P-Option, die als Vorwegmaßnahme für eine spätere Anbindung der Tunnel nach Bad Cannstatt an die bestehende Strecke nach Feuerbach geplant wurde, ist der Tunnelquerschnitt im Bereich der Unterfahrung der Presselstraße 10 und des Bülowbogens größer und vor allem höher als in den anderen Abschnitten mit kreisförmigen Tunnelquerschnitten (Bilder 1 und 3).



**Bild 1:** Lageplan Presselstraße

Für die Unterfahrung der Gebäude waren ursprünglich Hebungsinjektionen zum Ausgleich vortriebsbedingter Senkungen vorgesehen. Durch 3D-FE-Berechnungen mit dem Programmsystem FEST03 konnte von WBI allerdings gezeigt werden, dass eine Unterfahrung der Gebäude ohne Hebungsinjektionen möglich ist, wenn für die Schichten des ausgelaugten Gipskeupers die charakteristischen Kennwerte angenommen werden können.



Bild 2: Gebäude Presselstraße 10 und 12

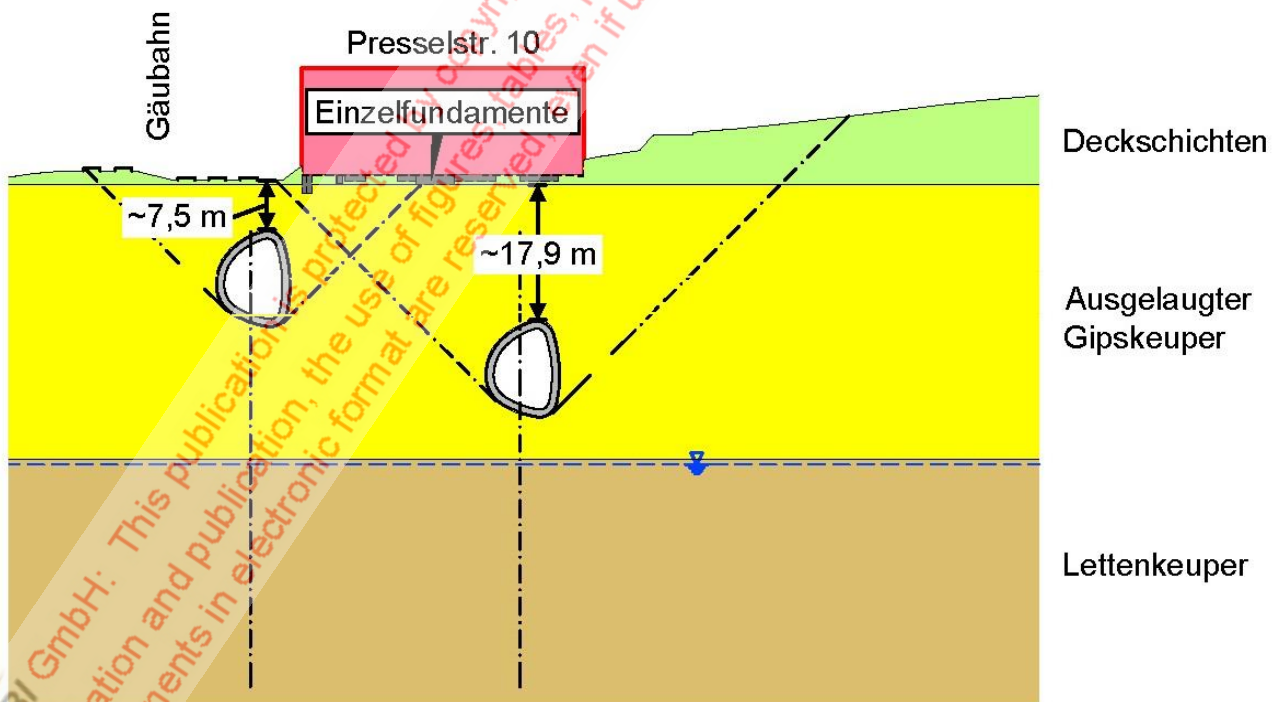


Bild 3: Querschnitt, Presselstraße 10

## 2. Unterfahrung der Presselstraße 10 mit der tiefliegenden Röhre, FE-Berechnungen

In den Berechnungen wurde zunächst die tiefliegende Röhre mit dem Querschnitt der P-Option berücksichtigt (Bild 4). Die obere, horizontale Berandung des Berechnungsausschnitts wurde dabei in Höhe der Gründungssohle des Gebäudes Presselstraße 10 angenommen. Die Belastung aus dem auf Einzel- und Streifenfundamenten gegründeten Gebäude der Presselstraße 10 wurde in Form einer Gleichlast simuliert (Bilder 3, 4 und Fritz Deufel Ing. GmbH 2001).

Die Senkungen im Bereich der Gründungsebene des Gebäudes hängen unter anderem von den angenommenen Scherparametern und dem Verformungsmodul des anstehenden ausgelaugten Gipskeupers ab. Der Verformungsmodul ist, wie in Wittke 2015 erläutert, von der Zusammensetzung des Ausgangsgestein abhängig. Für die Überprüfung der Machbarkeit eines Vortriebs ohne Hebungsinjektionen wurde zunächst davon ausgegangen, dass der ausgelaugte Gipskeuper der schlechtesten Klasse IV zugeordnet werden muss. Der E-Modul und die Scherparameter für diese Klasse können dem Bild 5 entnommen werden.

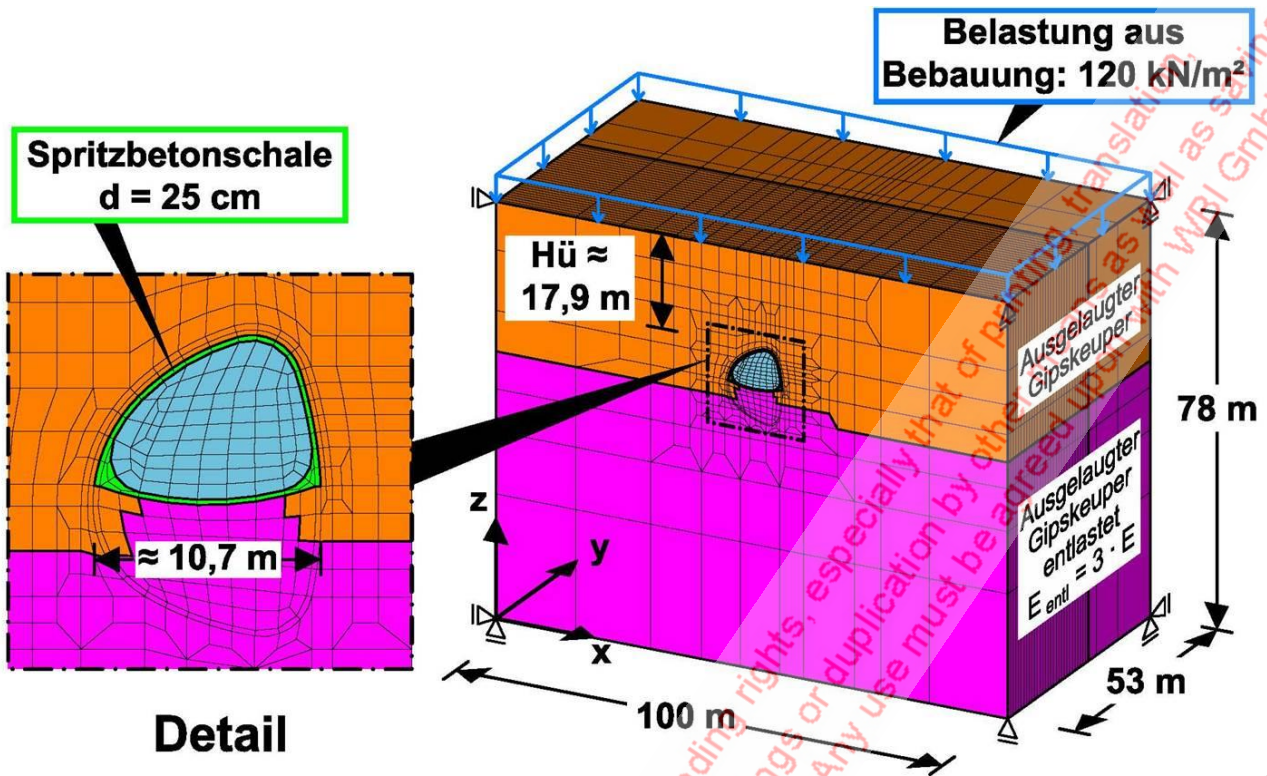
In den dreidimensionalen Berechnungen wurde ein vorseilender Kalottenvortrieb und ein nachfolgender Strossen- und Sohlvortrieb simuliert. Für den Kalottenvortrieb wurden eine Abschlaglänge und ein Sohlschluss von 1 m angenommen. Es wurde eine 25 cm dicke Spritzbetonschale berücksichtigt. Der Sohlschluss beim Strossen- und Sohlausbruch wurde mit 4 m deutlich größer gewählt (Bild 5). In einem ersten Fall wurde zunächst keine Ortsbruststützung simuliert.

Die Verschiebungen infolge Kalottenvortrieb, die sich für diesen Fall ergaben, sind im Bild 6 in einem Längsschnitt dargestellt. Es fällt auf, dass sich sehr große Verschiebungen der Ortsbrust ergeben, die dazu führen, dass vergleichsweise große dem Vortrieb vorseilende Verschiebungen auftreten. In der Gründungsebene des Gebäudes treten vorseilend etwa 23 mm auf, die auf 37 mm in größerer Entfernung zur Ortsbrust anwachsen (Bild 6). Die großen berechneten Verschiebungen an der Ortsbrust zeigen die Bedeutung einer Ortsbruststützung.

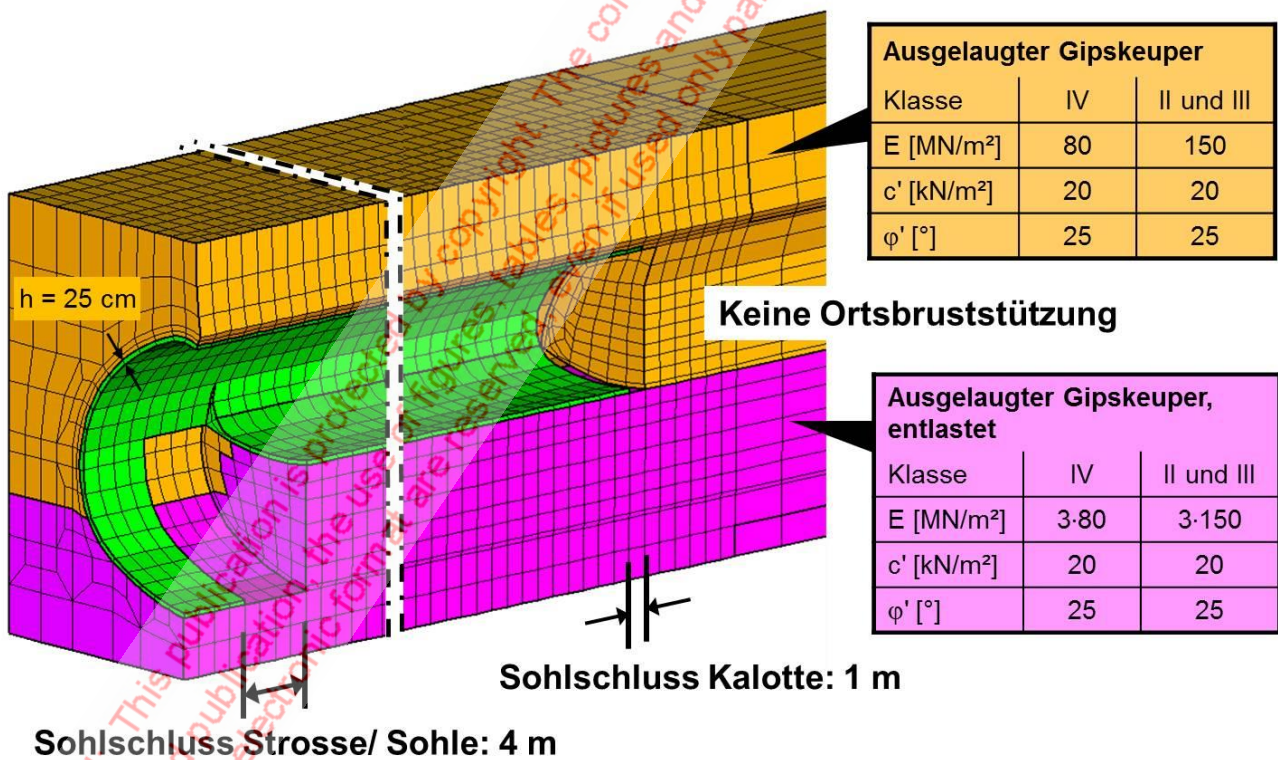
Tatsächlich lösen sich beim Vortrieb im ausgelaugten Gipskeuper immer wieder größere Flächen aus der Ortsbrust heraus, wenn die Ortsbrust, wie auf dem Bild 7 zu sehen, nicht ausreichend gesichert ist.

Die Senkungsmulde in dem in Bild 6 eingetragenen Querschnitt ist auf dem Bild 8 für den Zustand nach fertiggestelltem Kalottenvortrieb (oben) und nach dem Strossen- und Sohlvortrieb (unten) dargestellt. Sowohl die maximale Senkung von 53 mm als auch die maximale Neigung von  $\sim 1 : 395$  sind größer als die für das Gebäude der Presselstraße 10 zulässigen Werte.

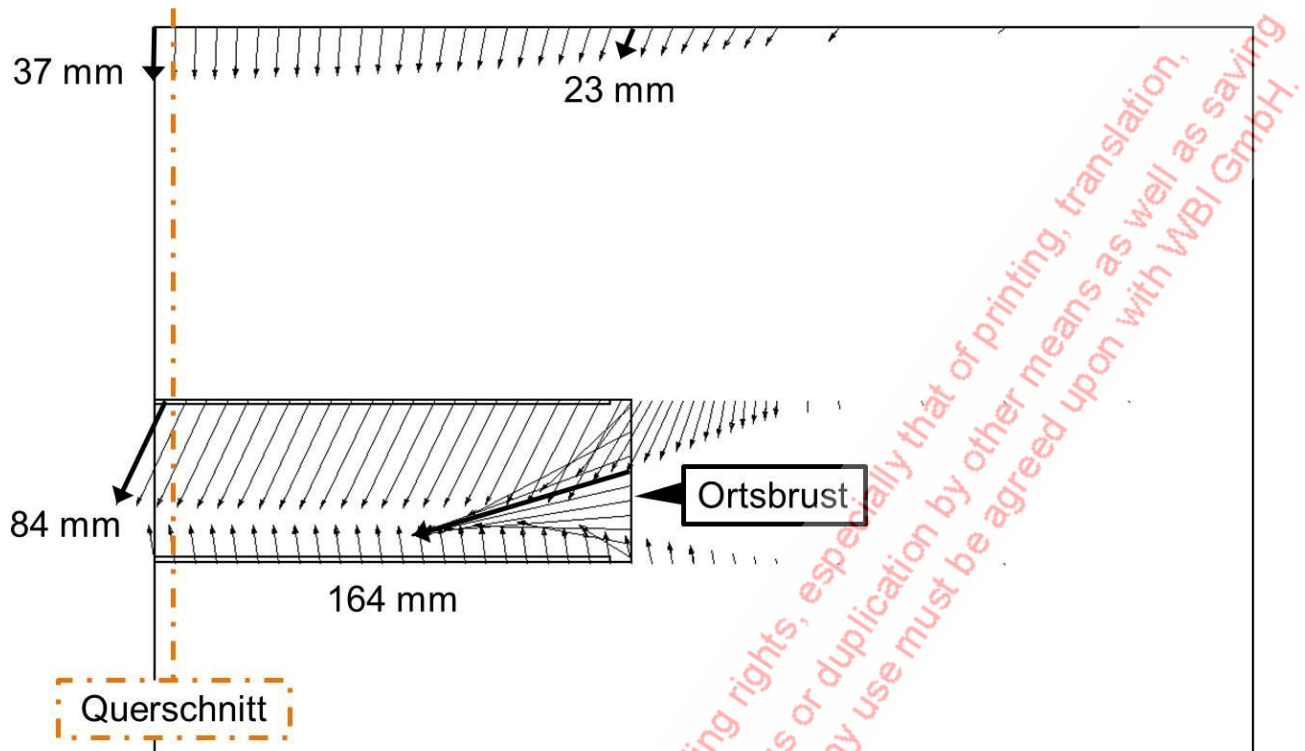
© Es mussten daher zusätzliche Sicherungsmaßnahmen vorgesehen werden.



**Bild 4:** Räumliche Berechnungen, FE-Netz und Randbedingungen



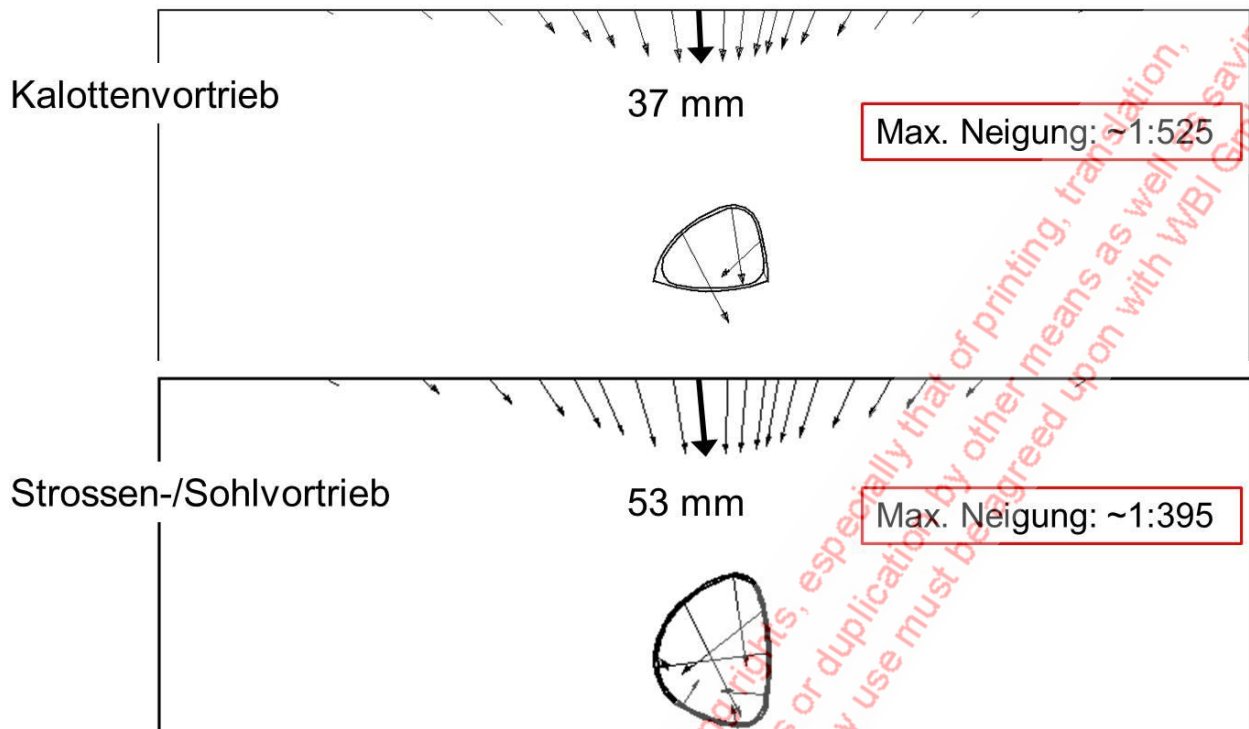
**Bild 5:** Simulation der Sicherungsmittel, Referenzfall



**Bild 6:** Referenzfall, Verschiebungen infolge Kalottenvortrieb, Längsschnitt



**Bild 7:** Herauslösen von Flächen aus der Ortsbrust



**Bild 8:** Referenzfall, Verschiebungen infolge Kalotten- und Strossen-/Sohlvortrieb, Querschnitt

### 3. Maßnahmen zur Begrenzung der Senkungen

Wie bereits erwähnt, ist eine Stützung der Ortsbrust z. B. durch Ortsbrustanker eine sinnvolle Maßnahme zur Begrenzung von Senkungen (Bild 9). Weiterhin wirken sich erfahrungsgemäß kurze Abschlaglängen günstig auf vortriebsbedingte Senkungen aus, deshalb wurden die Abschlaglängen für die Unterfahrung der Gebäude der Presselstraße auf 1 m beim Kalottenvortrieb und 2 m im Bereich der Strosse und Sohle begrenzt. Bei großen Querschnitten kann es darüber hinaus erforderlich sein, die Abschläge in Teilflächen aufzuteilen. Diese Unterteilung bleibt jedoch in den Standsicherheitsnachweisen unberücksichtigt.

Insbesondere bei dem hohen Querschnitt der P-Option kommt dem frühen Sohlschluss sowohl beim Kalotten- als auch beim Strossen- und Sohlvortrieb eine wesentliche Bedeutung als setzungsminimierende Maßnahme zu. Dadurch können die in den Querschnitt hinein gerichteten Verschiebungen und die daraus resultierenden Verschiebungen in der Gründungsebene der Gebäude begrenzt werden. Ebenso wirkt sich eine dickere und damit biegesteifere Spritzbetonschale günstig aus.

In Fällen, in denen die ungesicherte Ausbruchslaibung nicht standsicher ist, kann auch ein Rohrschirm setzungsmindernd wirken.

Die Wirkung von Ortsbrustankern und eines früheren Sohlschlusses beim Strossen- und Sohlvortrieb wurden in den Fällen 2 und 3 in FE-Berechnungen untersucht (Bilder 10 und 11). Es zeigt sich, dass beide Maßnahmen zu einer Reduzierung der Senkungen und der Neigungen der Senkungsmulde führen. Auch bei der konservativen Annahme eines ausgelaugten Gipskeupers der Klasse IV ergeben sich bei Ansatz von Ortsbrustankern mit

einem Durchmesser von 28 mm im Raster von 1,5 m x 1,5 m und bei einem Sohlschluss nach 2 m Senkungen in der Gründungssohle, die kleiner als die zulässigen Werte sind (Bild 11).

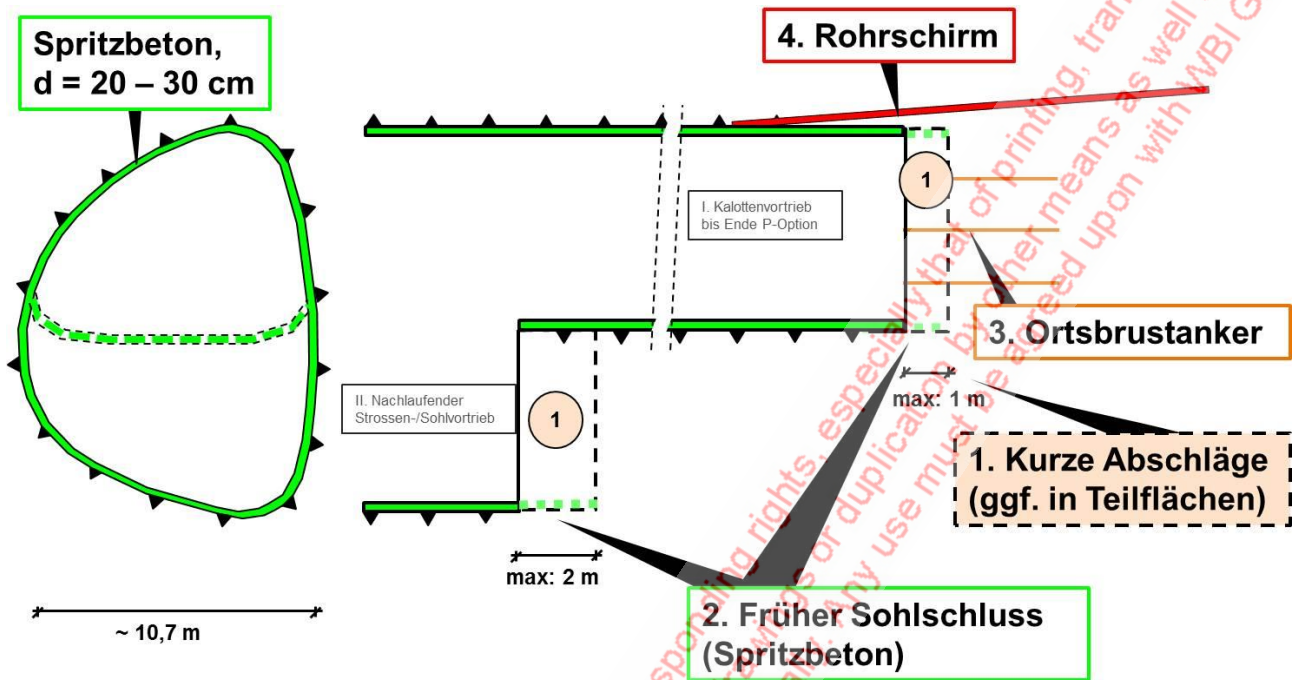


Bild 9: Maßnahmen zur Begrenzung der Senkungen

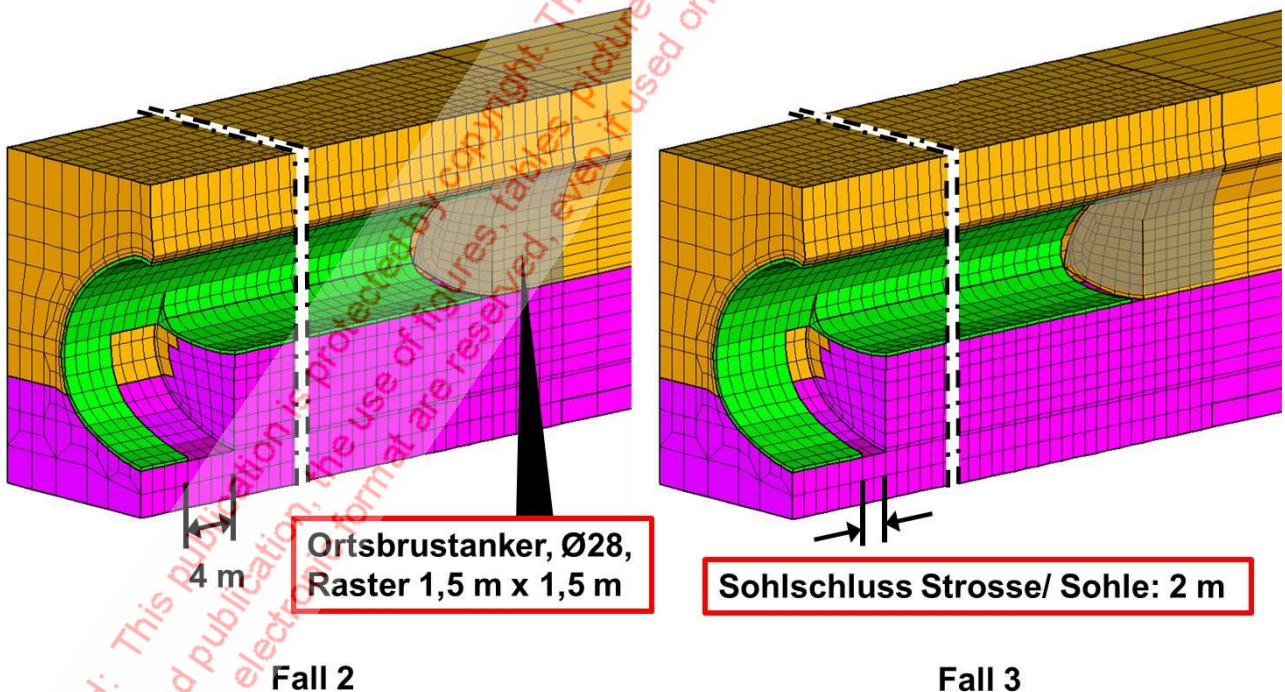
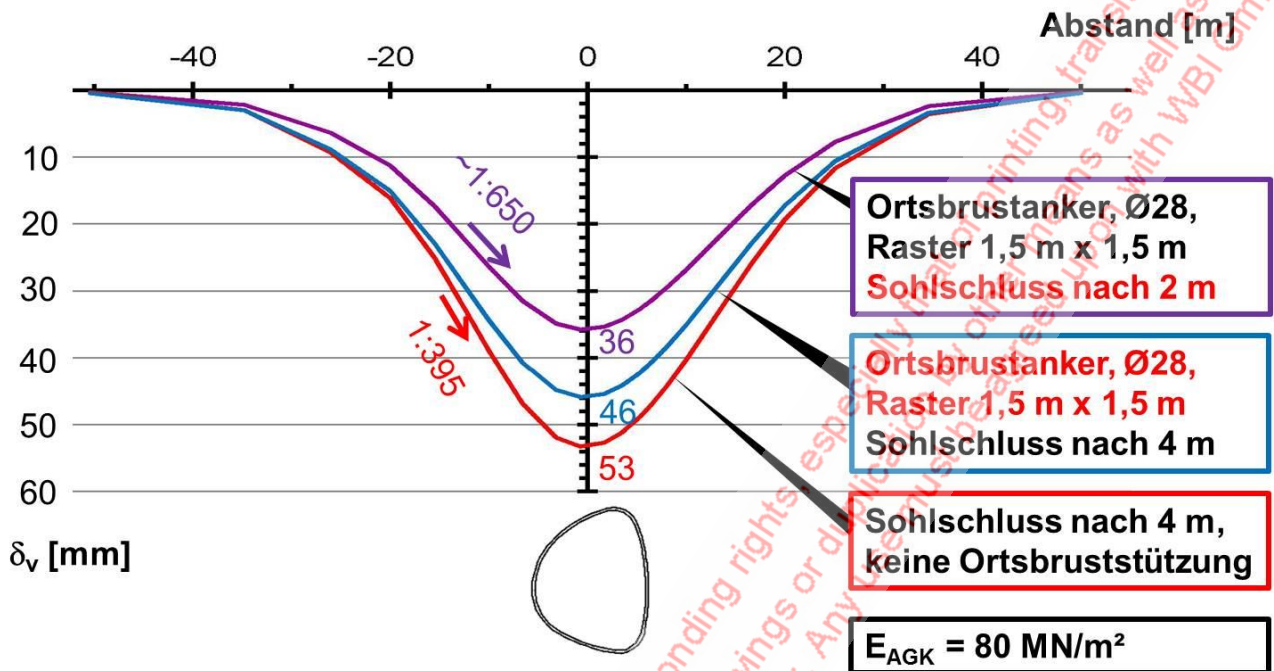


Bild 10: Weitere untersuchte Fälle

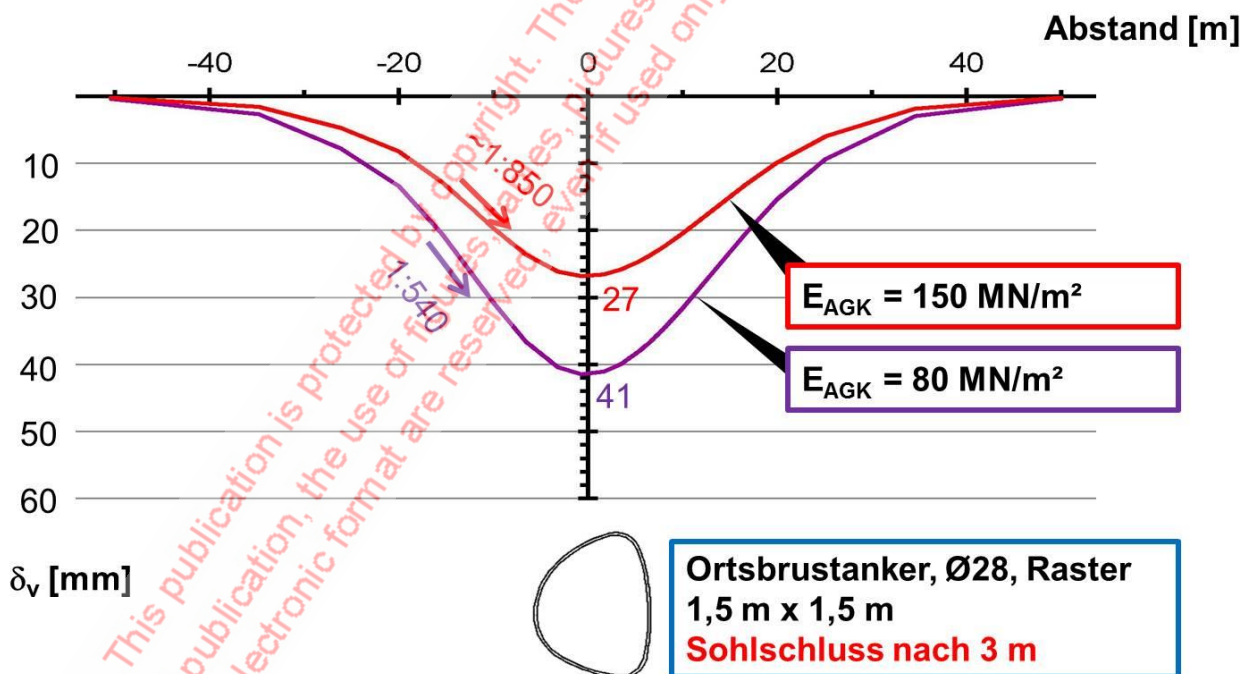
Die beim Vortrieb der Zulaufstrecken durchgeführten Kartierungen und die an Proben aus dem Vortrieb gemessenen Wassergehalte zeigten, dass der in diesem Bereich angetroffene ausgelaugte Gipskeuper eher den Klassen II und III zuzuordnen ist und somit einen



größeren E-Modul von  $E = 150 \text{ MN/m}^2$  aufweist (Bild 5). Ergänzende Berechnungen mit diesem Wert zeigten, dass sich noch kleinere Senkungen ergeben (Bild 12).



**Bild 11:** Einfluss von Ortsbrustankern und frühem Sohlschluss auf die Senkungen in der Gründungsebene nach Strossen- und Sohlausbruch



**Bild 12:** Einfluss des E-Moduls des ausgelaugten Gipskeupers auf die Senkungen in der Gründungsebene

Entsprechende Berechnungen wurden auch für die hochliegende Röhre durchgeführt und mit den oben beschriebenen Berechnungen überlagert. Die Prognose für einen E-Modul des ausgelaugten Gipskeupers von  $E = 150 \text{ MN/m}^2$  und für einen Sohlschluss der Strosse und Sohle nach 3 m ist auf dem Bild 13 dargestellt.

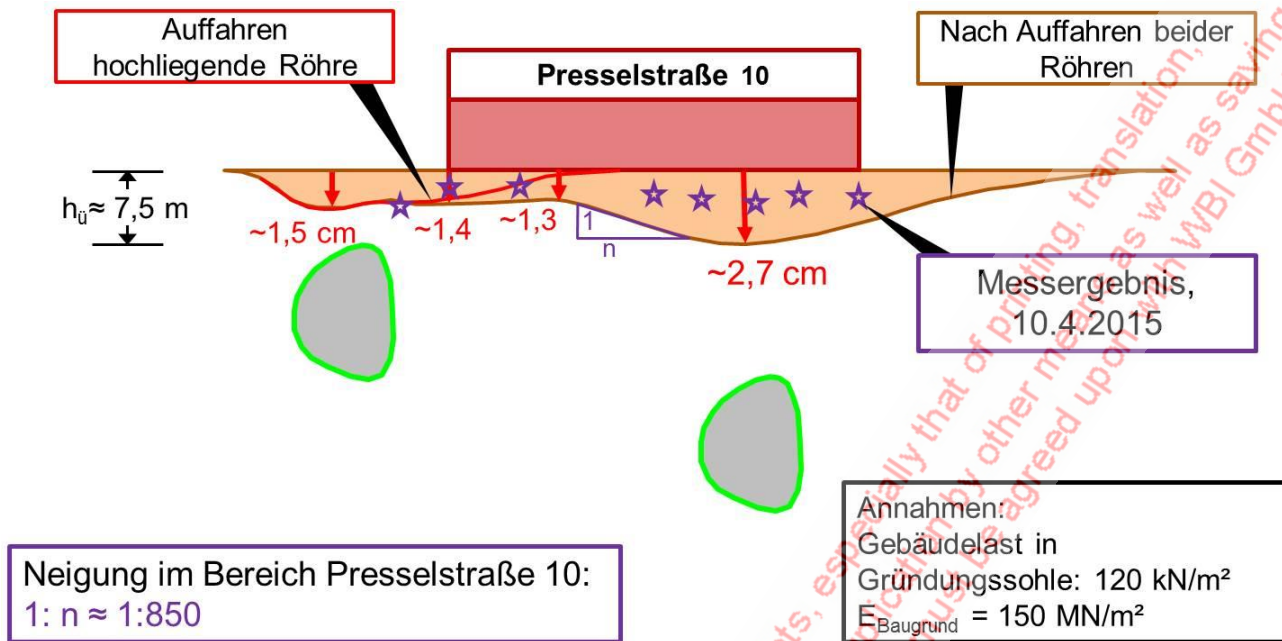


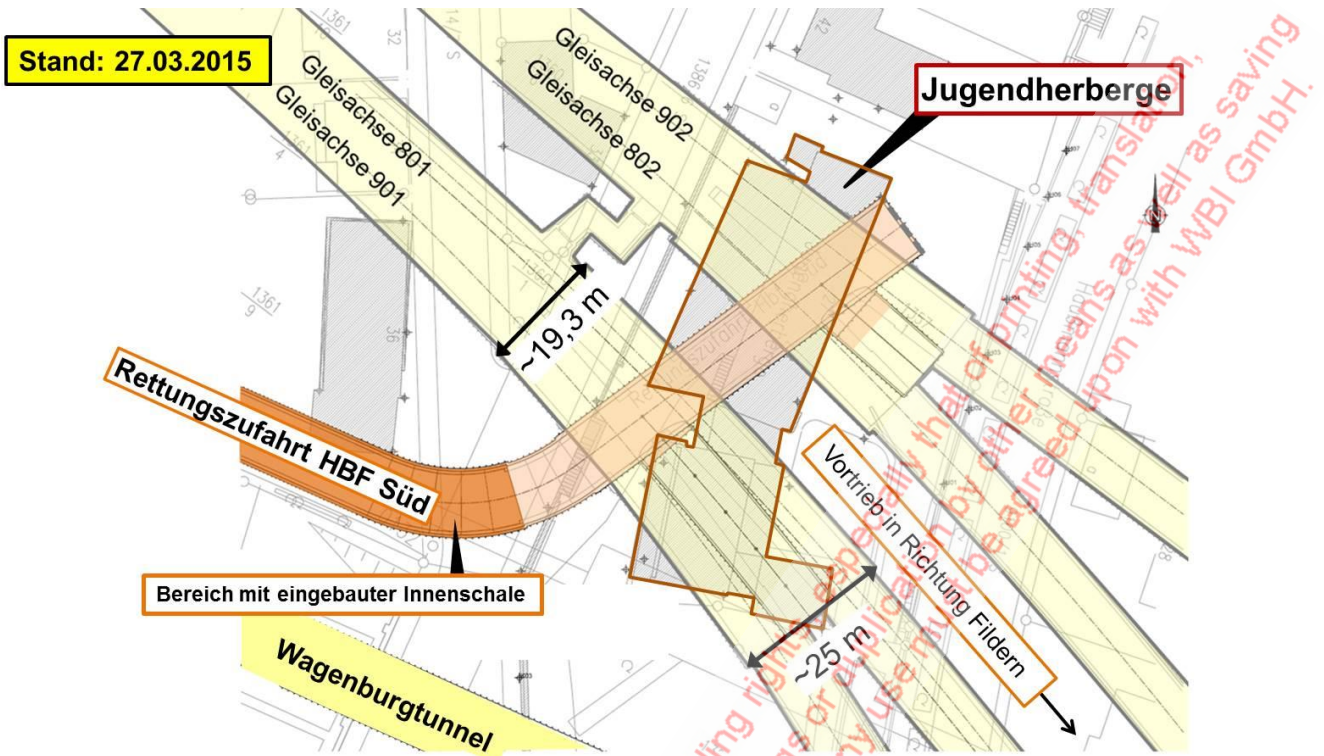
Bild 13: Prognose der Senkungen und Messergebnisse

#### 4. Prognostizierte und gemessene Senkungen

Die Ergebnisse der Prognoseberechnungen wurden den Eigentümern der Gebäude vorgestellt und erläutert. Die DB PSU und die Gebäudeeigentümer haben sich auf dieser Grundlage darauf geeinigt, dass die Hebungsinjektionen entfallen können. Während des Vortriebs wurden sowohl die Verschiebungen im Tunnel als auch die Senkungen an der Geländeoberfläche und an den Gebäuden in kurzen Zeitabständen gemessen. Die Ergebnisse wurden fortlaufend mit den Prognosewerten verglichen. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung (Bild 13). Zusätzlich zu den Kartierungen der Ortsbrust wurden aus dem Vortrieb regelmäßig Proben des ausgelaugten Gipskeupers entnommen und auf ihren Wassergehalt untersucht. Anhand dieser Messungen konnten die Annahmen in den Berechnungen ebenfalls bestätigt werden.

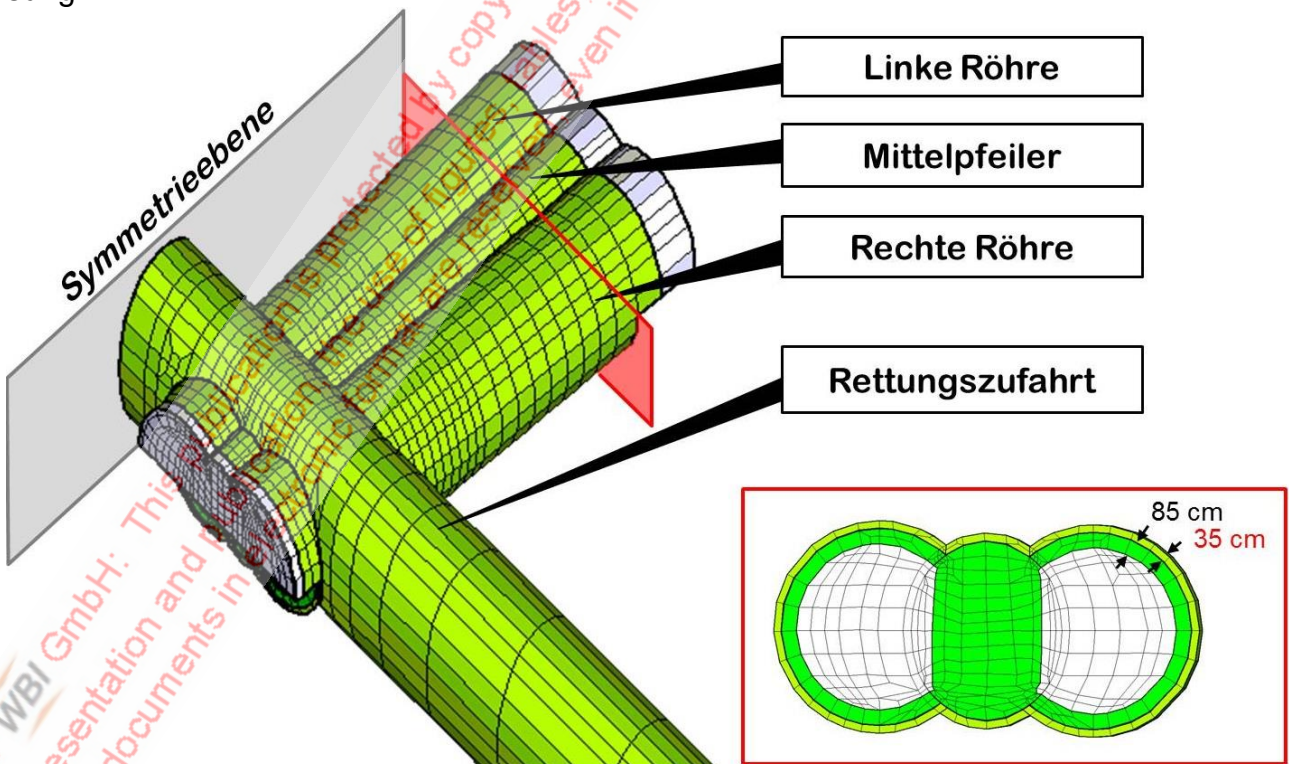
#### 5. Rettungszufahrt Hbf. Süd und Verzweigungsbauwerk

Auch die Rettungszufahrt Hbf. Süd und das Verzweigungsbauwerk, in dem die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim aus dem Fildertunnel abzweigen, liegen - zumindest abschnittsweise - in den Schichten des ausgelaugten Gipskeupers (Bild 14). Insbesondere wegen der sehr großen Querschnitte ist trotz der vergleichsweise großen Überdeckung im Bereich des Verzweigungsbauwerks auch hier damit zu rechnen gewesen, dass sich infolge des Tunnelbaus Senkungen an der Geländeoberfläche ergeben. Daher war bzw. ist es auch hier wichtig, detaillierte Prognosen der Senkungen auszuarbeiten und diese permanent mit den Messergebnissen zu vergleichen.



**Bild 14:** RZF HBF Süd und Verzweigungsbauwerk, Lageplan, Vortriebsstand am 27.3.2015

Eine entsprechende Prognose wurde wie beim Beispiel der Unterfahrung der Presselstraße mit Hilfe von dreidimensionalen FE-Berechnungen durchgeführt (Bild 15). Der Vortrieb des Verzweigungsbauwerks ist noch nicht abgeschlossen. Für den Vortrieb der Rettungszufahrt ergab sich aber bereits eine gute Übereinstimmung zwischen Prognose und Messung.



**Bild 15:** FE-Netz, Detail, Verzweigungsbauwerk

## Literatur

Fritz Deufel Ing. GmbH: Übersicht Haus 1 und Haus 2/Teil A + B + C, Fundamentsohlen, Plan-Nr. FunS001 und FunS002, 12.11.2001.

Wittke, W.: Baugrundverhältnisse des Bahnprojekts Stuttgart – Ulm. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.

© WBI GmbH: This publication is protected by copyright. The corresponding rights, especially that of printing, translation, presentation and publication, the use of figures, tables, pictures and drawings or duplication by other means as well as saving the documents in electronic format are reserved, even if used only partially. Any use must be agreed upon with WBI GmbH.