

# Beherrschung von Horizontalspannungen beim Bau des Flughafenbahnhofs

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann

## Zusammenfassung

Der Stuttgarter Flughafentunnel soll mit dem Flughafentunnel an die Neubaustrecke Stuttgart - Ulm angeschlossen werden. Die unterirdische Station Flughafen soll mit einer zentralen Zugangsanlage und mit dem Zugang Ost erschlossen werden. Beide Zugangsanlagen binden vollständig in die überwiegend aus Tonschluffsteinen bestehende Schicht des Lias  $\alpha$  ein. Beim Bau von Baugruben in dieser Formation wurden in der Vergangenheit große horizontale Verschiebungen beobachtet, die sich bis in große Entfernung von den Baugruben erstreckten und auf erhöhte Horizontalspannungen zurückgeführt werden können. Diese Horizontalverschiebungen können zu Zerrungen an der bestehenden Bebauung führen und müssen daher vermieden werden.

Für die zentrale Zugangsanlage wurde daher ein Bauverfahren entwickelt, das die Horizontalverschiebungen minimiert und in diesem Beitrag vorgestellt wird. Anhand von dreidimensionalen FE-Berechnungen wird die Wirksamkeit des vorgesehenen Bauablaufs aufgezeigt.

## 1. Einleitung

Die Neubaustrecke Stuttgart - Ulm soll mit Hilfe des Flughafentunnels an den Flughafen Stuttgart angeschlossen werden. Die unterirdische Station Flughafen liegt im Bereich der Messe Stuttgart, des Kongresszentrums, mehrerer Hotels und Parkhäuser und des Flughafentlastungstunnels. Sie soll durch eine zentrale Zugangsanlage und den Zugang Ost erschlossen werden (Bild 1).



Bild 1: Lageplan

Die zentrale Zugangsanlage hat eine Länge von etwa 62 m. In geringer horizontaler Entfernung befinden sich ein geplantes und ein bereits hergestelltes Hotel, das FSG-Gebäude sowie der Flughafenentlastungstunnel. Um die bestehenden Gebäude nicht zu gefährden, ist bei der Planung und dem Bau der Zugangsanlage auf eine verformungsarme Bauweise zu achten.

## 2. Bauwerk

Die zentrale Zugangsanlage besteht aus einem kreisrunden Schacht, in dem die Aufzüge zur Station untergebracht sind sowie aus je einem östlich und westlich neben dem Schacht liegenden Technikgebäude (Bilder 2 und 3). Zwischen den Technikgebäuden und dem kreisrunden Schacht sollen Gebirgsstöcke verbleiben. Diese Gebirgsstöcke werden nur in Höhe der Station unterbrochen, um einen Übergang zwischen den beiden Stationsröhren außerhalb des kreisrunden Schachts zu ermöglichen (Bild 2).

Sowohl der kreisrunde Schacht als auch die beiden Technikgebäude liegen zwischen den beiden geplanten Stationsröhren des Flughafentunnels (Bild 4).

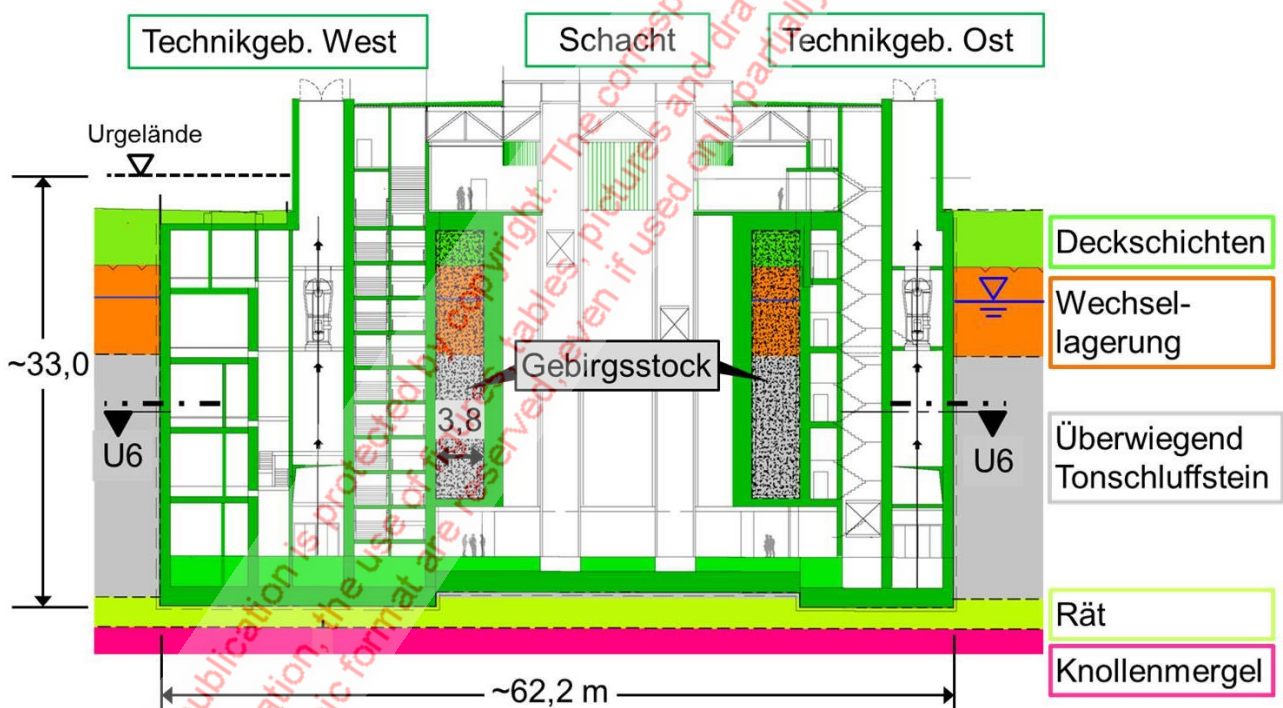


Bild 2: Längsschnitt und Untergrundprofil

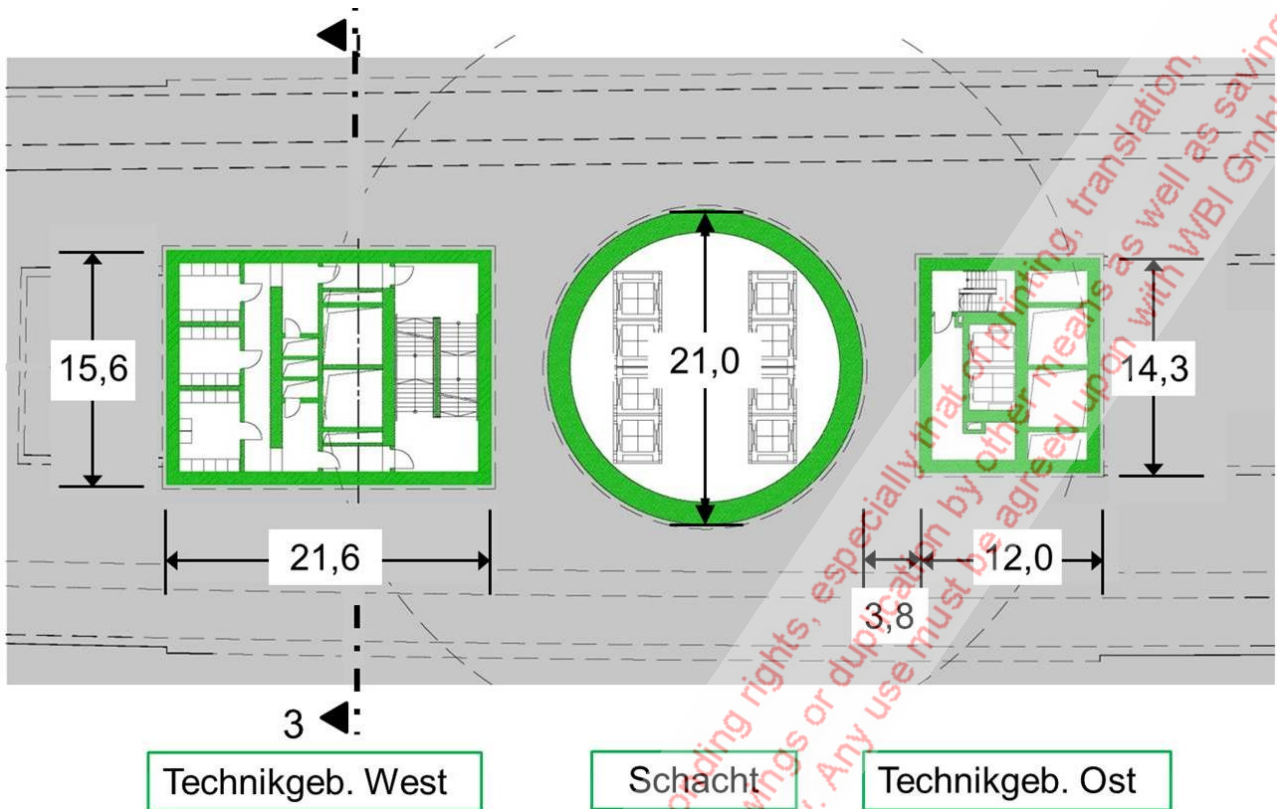


Bild 3: Ebene U6

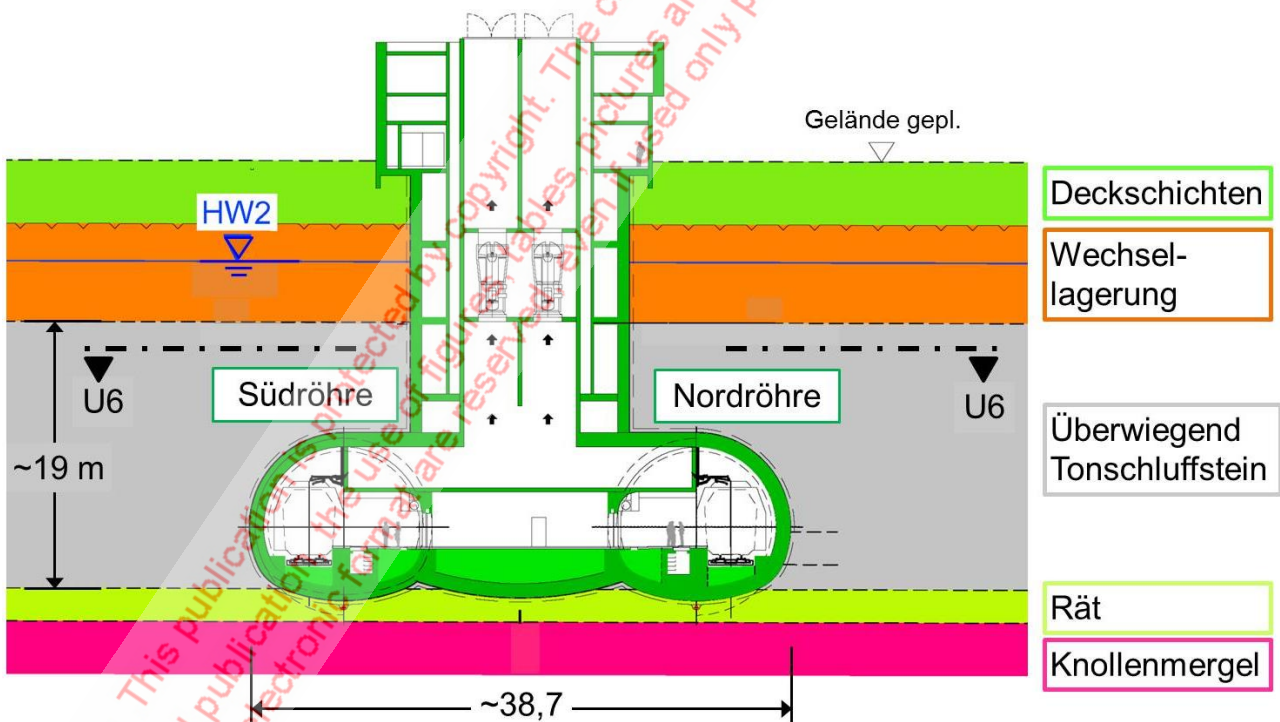


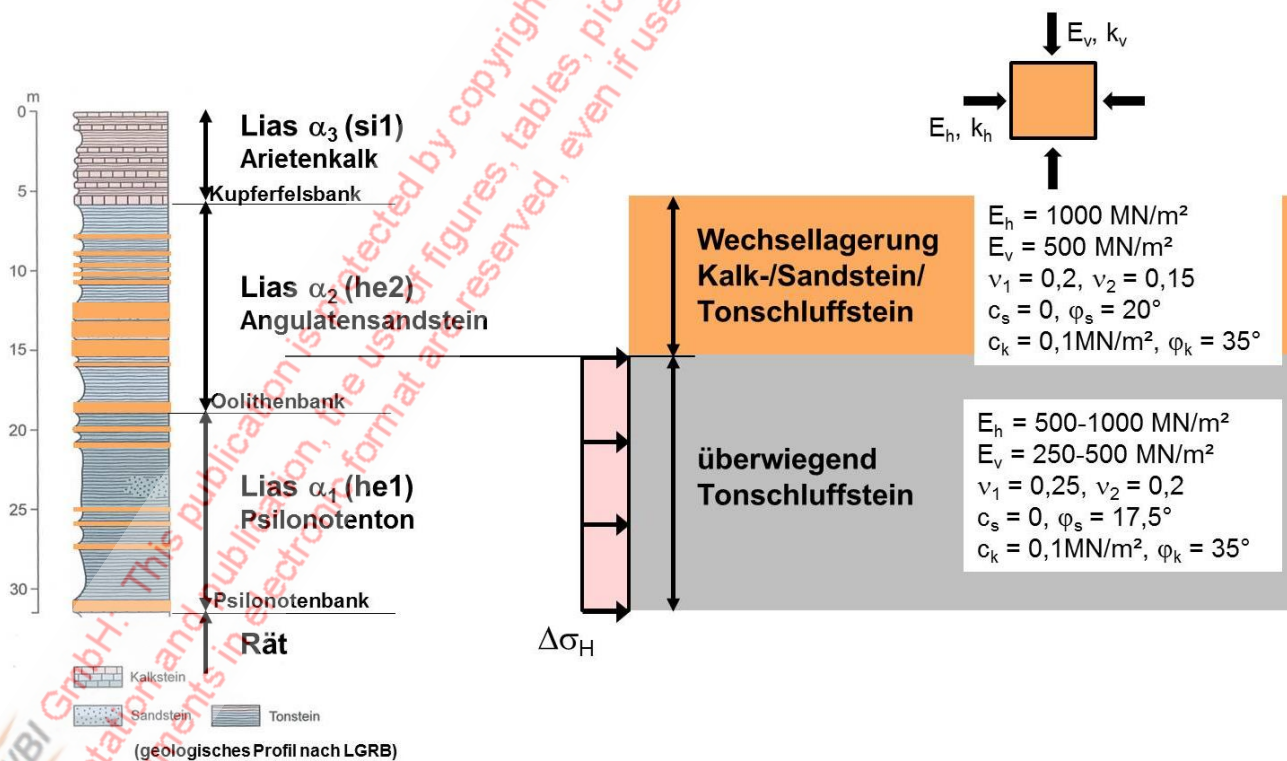
Bild 4: Querschnitt 3-3

### 3. Untergrundverhältnisse

Im unteren Bereich der zentralen Zugangsanlage stehen mit dem Lias  $\alpha_1$  oder Hettangium 1 eine tonsteinreiche Folge und darüber mit dem Lias  $\alpha_2$  oder Hettangium 2 eine im oberen Bereich kalksandsteinreiche Folge horizontaler Schichten an (Bild 5). Aus felsmechanischer Sicht kann man diese Schichtenfolge in ein überwiegend aus Tonschluffsteinen bestehendes Schichtpaket und eine Wechsellagerung mit deutlich größeren Anteilen an Kalk-/Sandsteinen gliedern (Bilder 2, 4 und 5). Oberhalb dieser Wechsellagerung schließen der Lias  $\alpha$ -Verwitterungston und der Filderlehm an. In bzw. unterhalb der Sohle steht das Rät an.

Für die in diesem Beitrag behandelte Fragestellung der Beherrschung der Horizontalspannungen sind insbesondere die überwiegend aus Tonschluffsteinen bestehenden Schichten von Interesse.

Bild 6 zeigt ein Foto der überwiegend aus Tonschluffsteinen bestehenden Schichten des Lias  $\alpha$ . Es ist deutlich die engständige Schichtung (S) in den Tonschluffsteinen zu erkennen, die zu einer abgeminderten Festigkeit in dieser Richtung führt ( $\varphi_s$  und  $c_s$ ). Außerdem erkennt man Klüfte (K), die allerdings häufig an den Schichtfugen absetzen. Daher kann man in Richtung der Klüfte von einer gewissen Kohäsion ausgehen ( $\varphi_k$  und  $c_k$ ). Etwa in der Mitte des auf dem Foto aufgeschlossenen Bereichs erkennt man eine in die Tonschluffsteine eingeschlossene Sandsteinbank. In den Sandsteinbänken ist die Schichtung deutlich weniger ausgeprägt. Allerdings ist auch in der Kalksandsteinbank das näherungsweise orthogonale Kluftsystem deutlich zu erkennen.



© Bild 5: Gliederung Schwarzhura  $\alpha$  und felsmechanisches Modell



Bild 6: Lias  $\alpha$ -Verwitterungston, Foto von der Haltestelle Universität

In den überwiegend aus Tonschluffsteinen bestehenden Schichten und in der Wechsellagerung des Lias  $\alpha$  wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Tunnelbauwerken und Baugruben erstellt (Wittke 2015, Wittke 2014, Wittke 1990, Wittke & Tegelkamp & Wittke-Gattermann 2003, Grüter 1988, Böttcher & Schmidt & Erichsen 1998). Aus den in diesem Zusammenhang durchgeführten Untersuchungen und Messungen während der Bauzeit wurden felsmechanische Kennwerte abgeleitet (Wittke 2015). Bild 5 enthält eine Zusammenstellung der im Bereich des Flughafens maßgebenden Verformungsmoduli, die für horizontale und vertikale Belastungen unterschiedlich sind. Außerdem sind in Bild 5 die Querkontraktionszahlen und die Festigkeiten auf den Trennflächen aufgelistet.

Erfahrungen beim Bau von Tunneln und Baugruben in diesem Schichtpaket haben gezeigt, dass in den Tonschluffsteinen mit erhöhten Horizontalspannungen gerechnet werden muss (Wittke 2014). Diese Spannungen haben zum Beispiel beim Aushub der Baugrube für die Haltestelle Universität der S-Bahn Stuttgart zu horizontalen Verschiebungen der Baugrubenwände geführt (Bild 7, Wittke 2014, Wittke 1990).

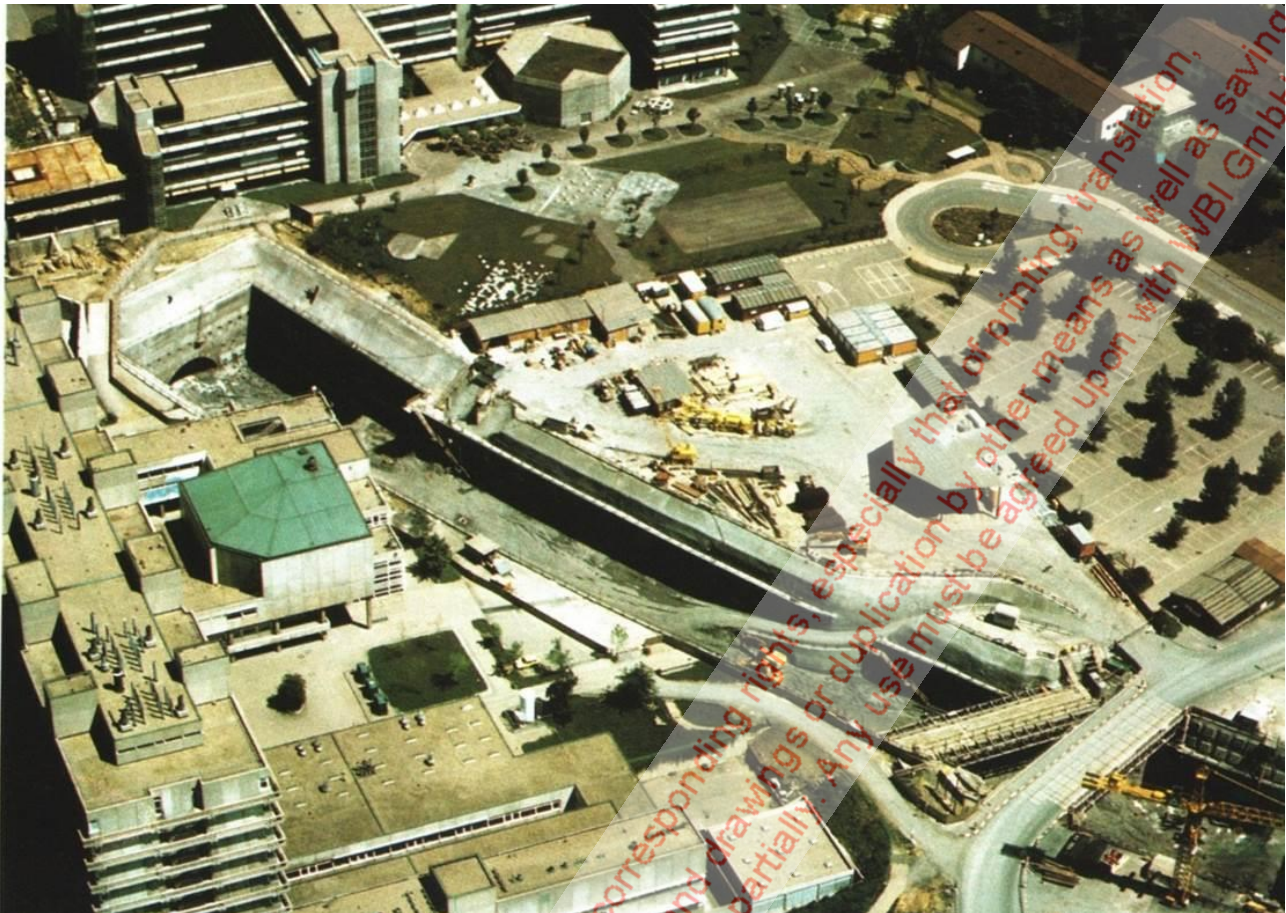


Bild 7: S-Bahn Stuttgart - Station Universität

Bild 8 zeigt die im Bereich der etwa 220 m langen Baugrube der Haltestelle Universität gemessenen Verschiebungen in einem Querschnitt, der etwa in Baugrubenmitte liegt (Bild 9). Es zeigt sich, dass beim Aushub der ca. 20 m tiefen Baugrube im Tonschluffstein horizontale Verschiebungen von bis zu ca. 60 mm gemessen wurden. Die Verschiebungen nahmen mit zunehmender Aushubtiefe deutlich zu. Wie auf dem Bild 9 zu erkennen ist, waren die gemessenen Verschiebungen in der Mitte der langen Baugrube deutlich größer als im Bereich der Baugrubenenden.

Ein Vergleich der gemessenen Konvergenzen der Baugrubenwände mit den Messergebnissen von 30 m langen, horizontalen Extensometern zeigte, dass mit den Extensometern nur etwa 40 % der gesamten horizontalen Verschiebungen gemessen werden konnten. Dies deutet auf eine sehr große Reichweite der Horizontalverschiebungen von 100 bis 150 m hin (Bild 10).

Die mit zunehmendem Abstand von der Baugrube abnehmenden horizontalen Verschiebungen des Baugrundes haben beim Bau der Haltestelle Universität zu Zerrungen und daraus folgenden Schäden in den benachbarten Gebäuden geführt, die im Bereich des Stuttgarter Flughafens unbedingt zu vermeiden sind. Hierfür ist es von Bedeutung, die Ursache der Zerrungen zu verstehen.

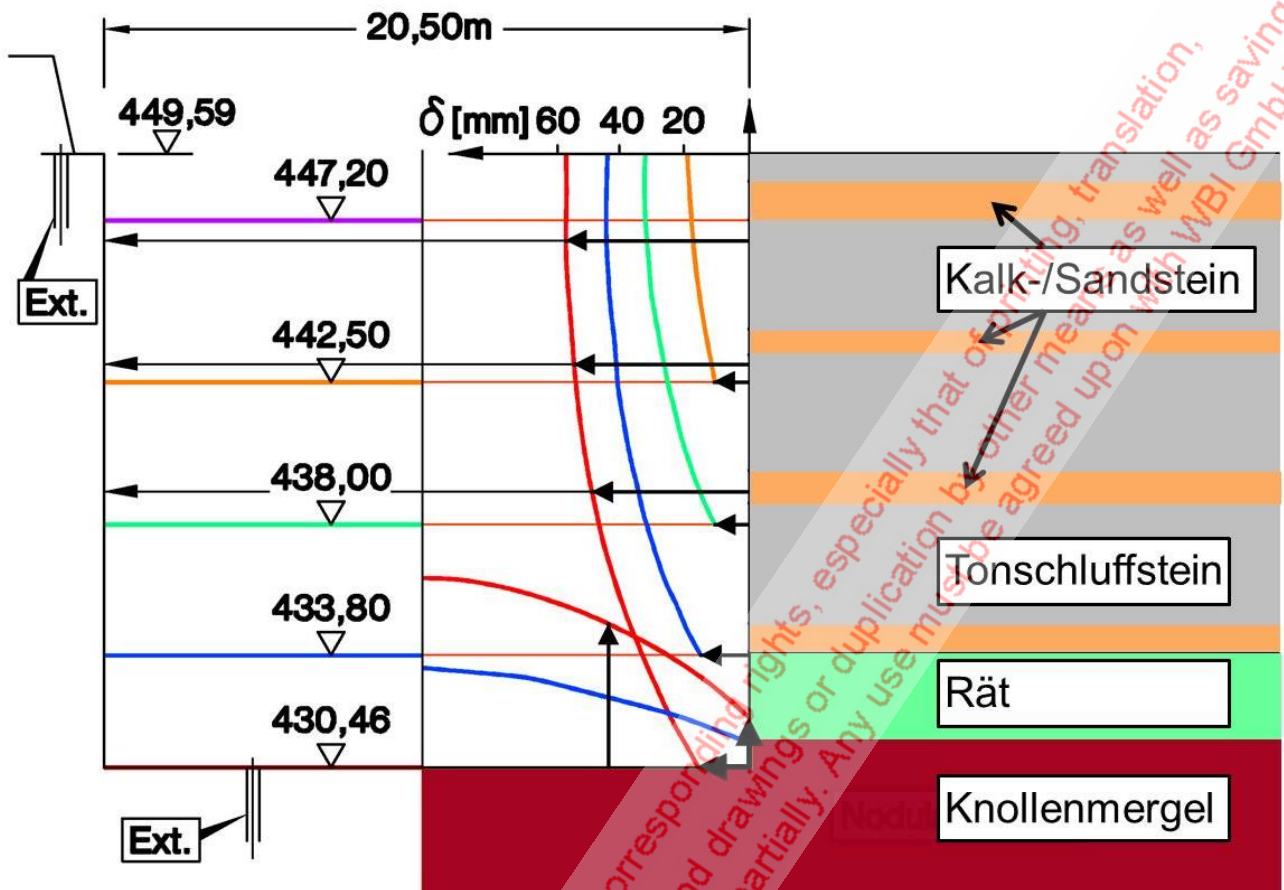


Bild 8: Baugrube Haltestelle Universität, gemessene Verschiebungen im Schnitt

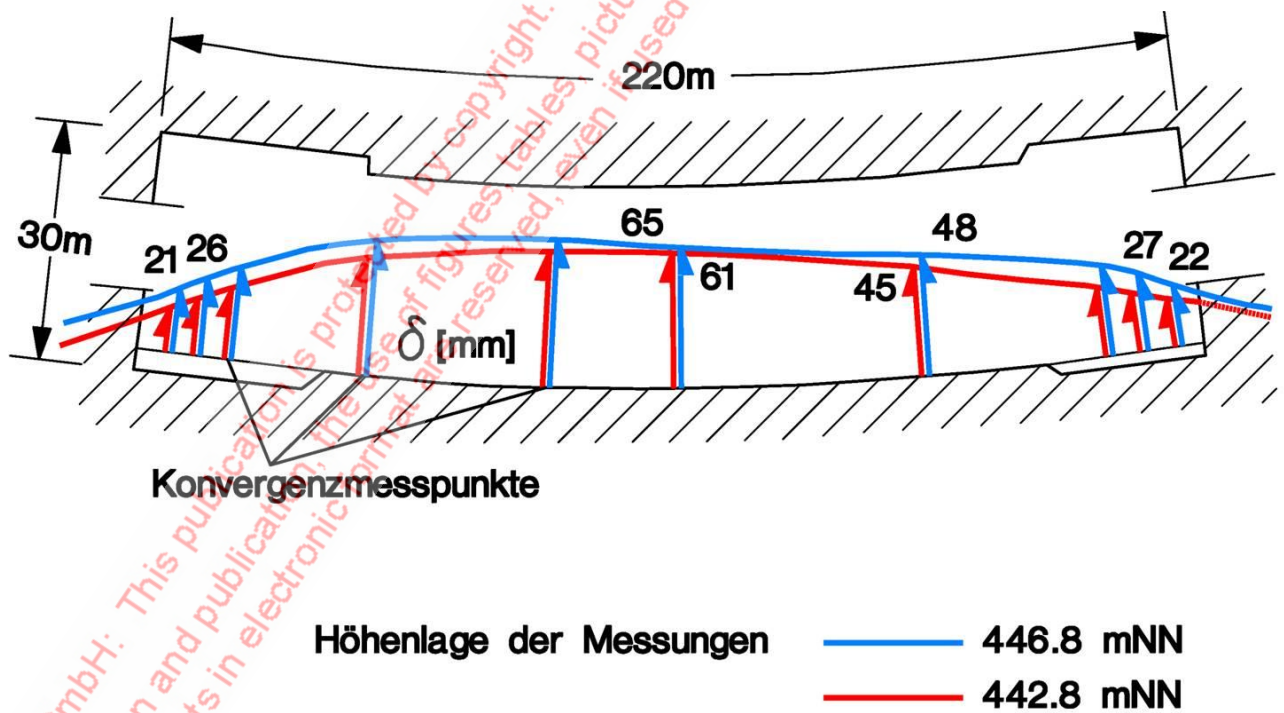


Bild 9: Baugrube Haltestelle Universität, Horizontalverschiebungen

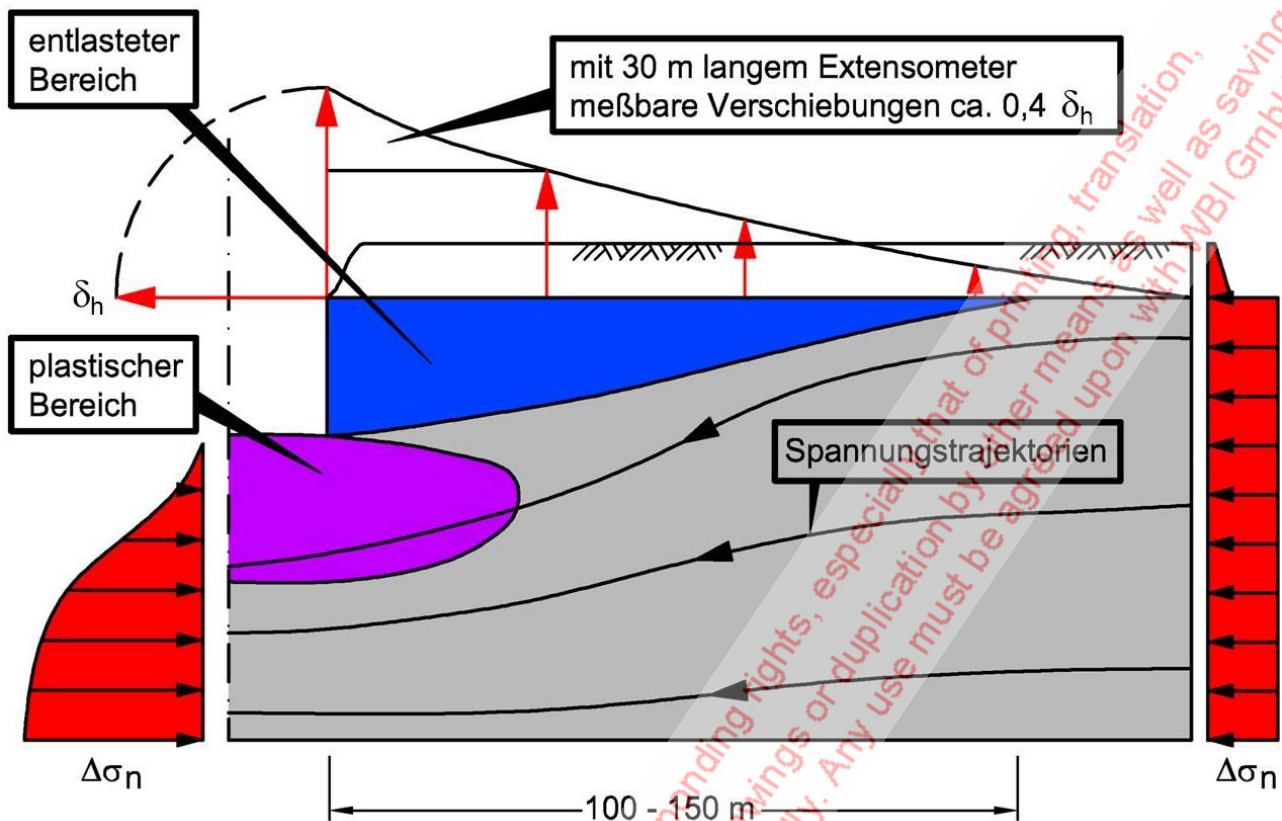


Bild 10: Haltestelle Universität, Umlagerung der Horizontalspannungen und Horizontalverschiebungen

Die horizontalen Primärspannungen, die in den Tonschluffsteinen vergleichsweise groß sind, müssen bei langen Baugruben in den Bereich unterhalb der Baugrube umgeleitet werden. Dabei kommt es unter der Sohle zu Spannungskonzentrationen. Durch die Neigung der Spannungstrajektorien kam es bei der Baugrube für die Haltestelle Universität zu einer Schubbeanspruchung auf den im Knollenmergel ausgebildeten flach geneigten Harnischflächen und zu Festigkeitsüberschreitungen (plastische Bereiche). Die Festigkeitsüberschreitungen führen zu einer Umlagerung der Spannungen in noch tiefere Bereiche (Bild 10).

Die Umlagerung der Spannungen in den Bereich unterhalb der Baugrube führt zu einer weiträumigen Entlastung neben der Baugrube, die umso größer ist, je tiefer die Baugrube ist und desto größer die plastischen Bereiche unterhalb der Sohle sind (blauer Bereich, Bild 10). Diese horizontale Entlastung führt zu horizontalen Verschiebungen.

Um die Verschiebungen gering zu halten muss daher die Entlastung gering gehalten werden. Dies kann durch eine Begrenzung der Baugrubenlänge und durch einen steifen Verbau erfolgen.

#### 4. Bauablauf

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, wurde für die zentrale Zugangsanlage der folgende Bauablauf vorgeschlagen:



Bis zur Oberkante Fels kann eine gemeinsame Baugrube für die Technikgebäude und den kreisrunden Schacht hergestellt werden und mit rückverankerten Bohrträgern mit Spritzbetonausfachung gesichert werden (Bild 11). Im Bereich der Wechsellagerung und in den überwiegend aus Tonschluffsteinen bestehenden Schichten sollen hingegen zunächst nur die Baugruben für die Technikgebäude abgeteuft werden (Bild 12). Dadurch wird die Länge der Baugrube begrenzt und die Gebirgsspannungen können sowohl in die Bereiche rechts und links neben den Einzelbaugruben als auch in den Bereich unterhalb von den Baugruben umgeleitet werden. Die Sicherung der Baugrubenwände soll zunächst mit Spritzbeton und Felsnägeln erfolgen. Im Bereich der Tonschluffsteine sollen - zumindest in der längeren westlichen Baugrube - zusätzlich temporäre Steifen eingebaut werden.

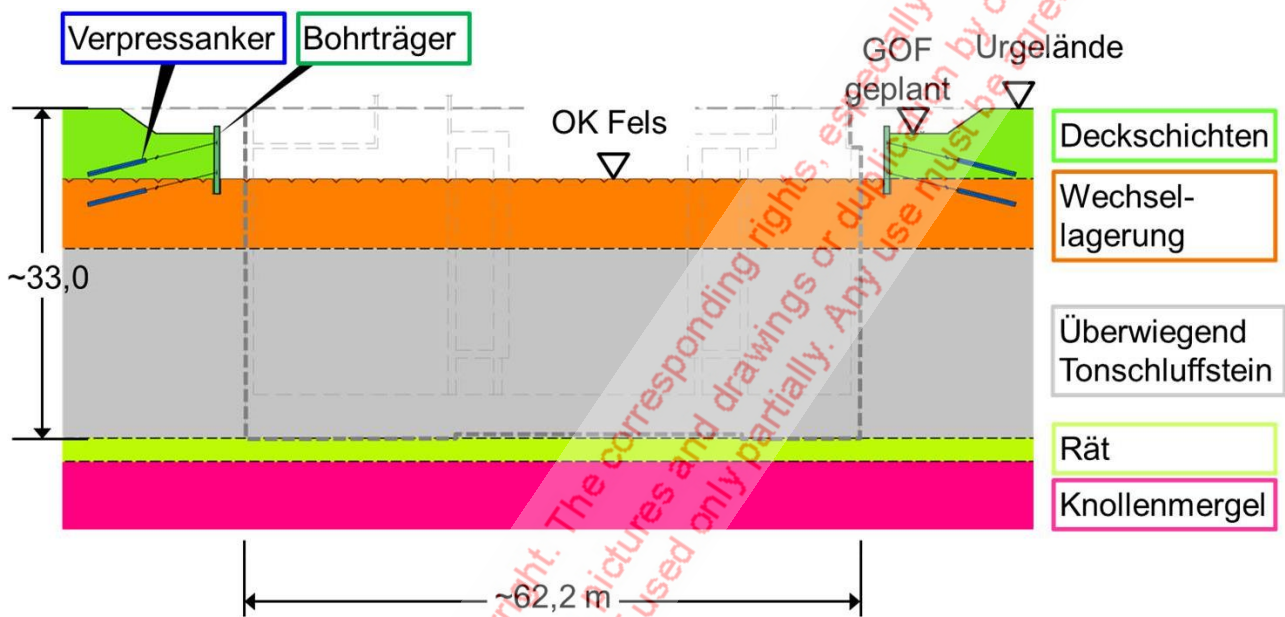


Bild 11: Bauphase 1: gemeinsame Baugrube bis OK Fels

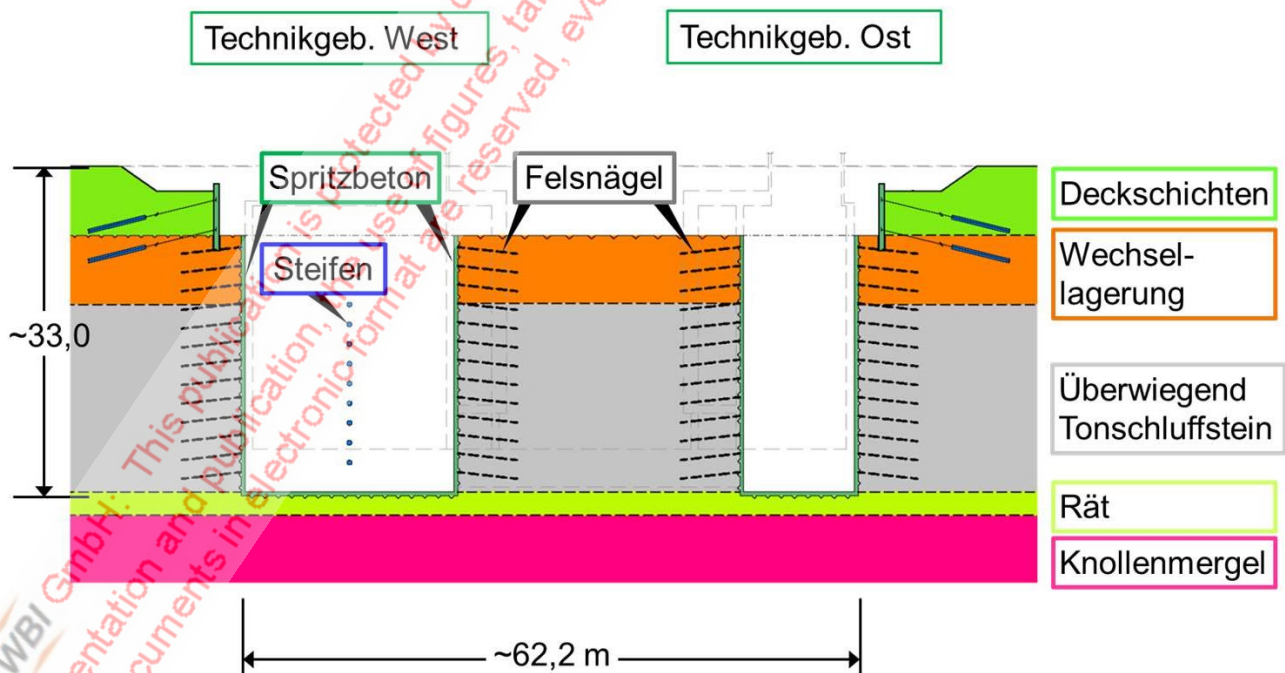


Bild 12: Bauphase 2: Herstellung rechteckige Baugruben im Fels für Technikgebäude West und Ost mit Sicherung aus Spritzbeton und Ankern

In der Bauphase 3 werden die Stahlbetonwände und Decken der Technikgebäude eingebaut (Bild 13). Die Abmessungen der Wände und Decken werden dabei so gewählt, dass sie die Lasten aus den Spannungsumlagerungen, die im Verlauf der Bauphase 4 (Aushub und Sicherung des zentralen Schachtes, Bild 14) auftreten, aufnehmen können.

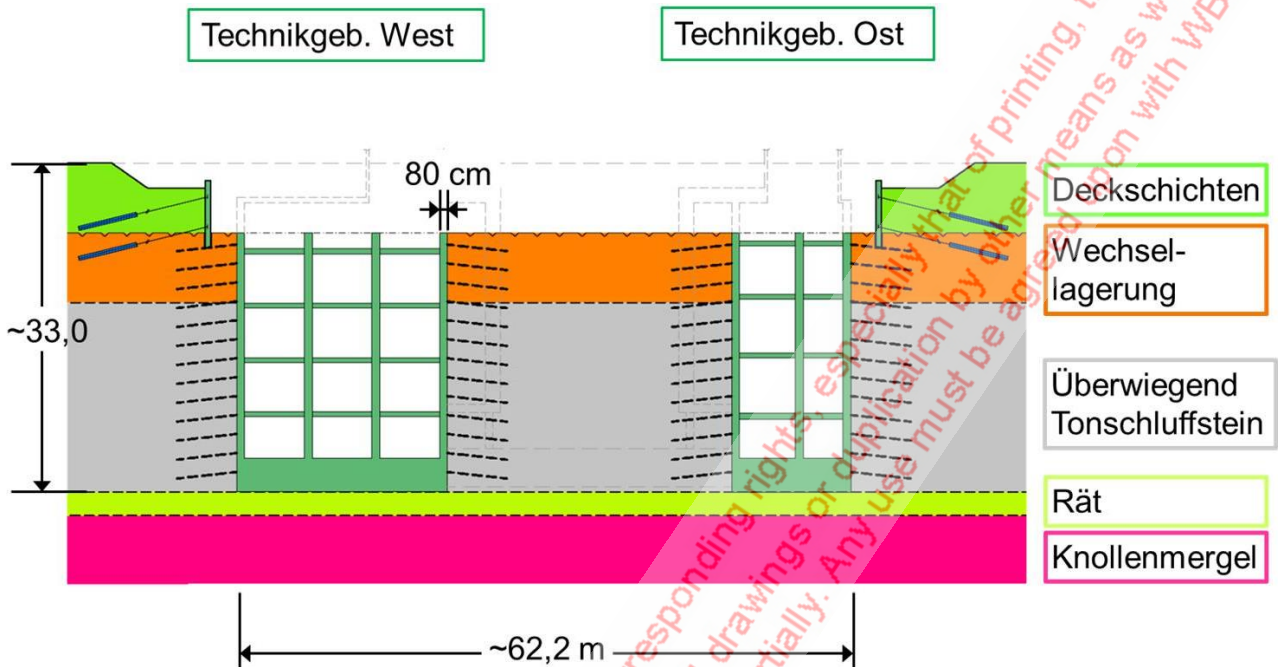


Bild 13: Bauphase 3: Herstellung Stahlbetonbauwerke für Technikgebäude West und Ost

In darauf folgenden Bauphasen, die hier nicht näher dargestellt werden, soll der Einbau der Stahlbetonauskleidung des kreisrunden Schachtes, der Ausbruch und die Sicherung der Stationsröhren, der Einbau der Innenschalen der Stationsröhren sowie der Ausbruch und die Sicherung der zwischen den Technikgebäuden und dem Schacht liegenden Übergangsbereiche zwischen den Stationen hergestellt werden (vgl. Bilder 2 bis 4).

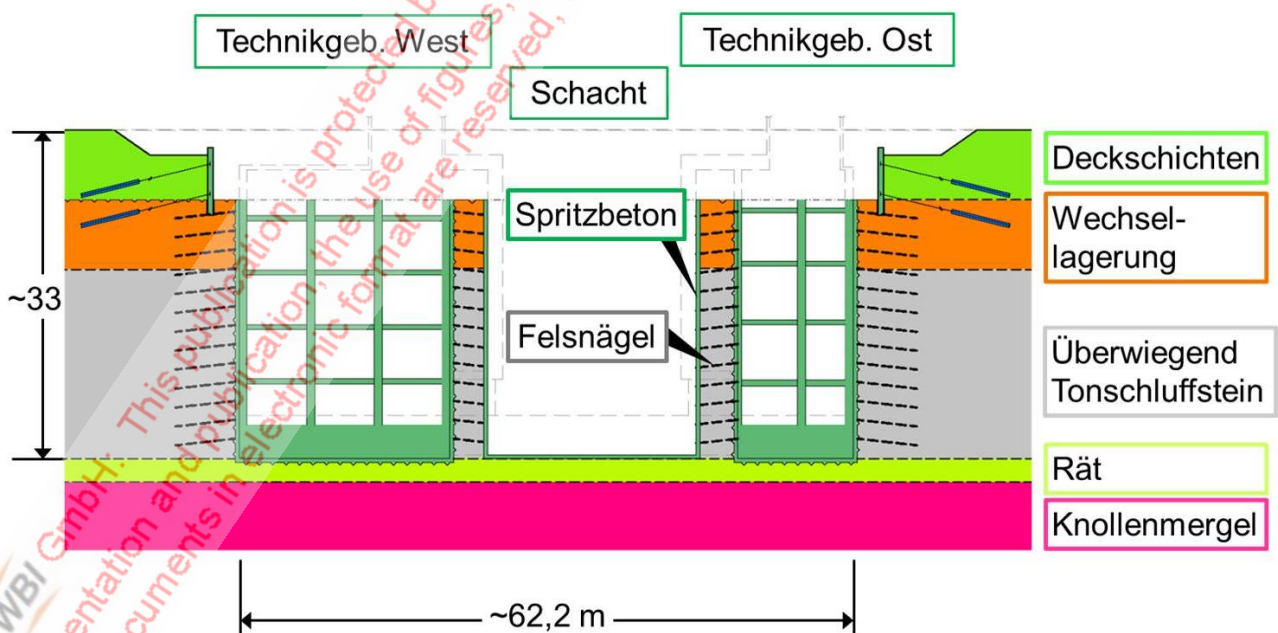


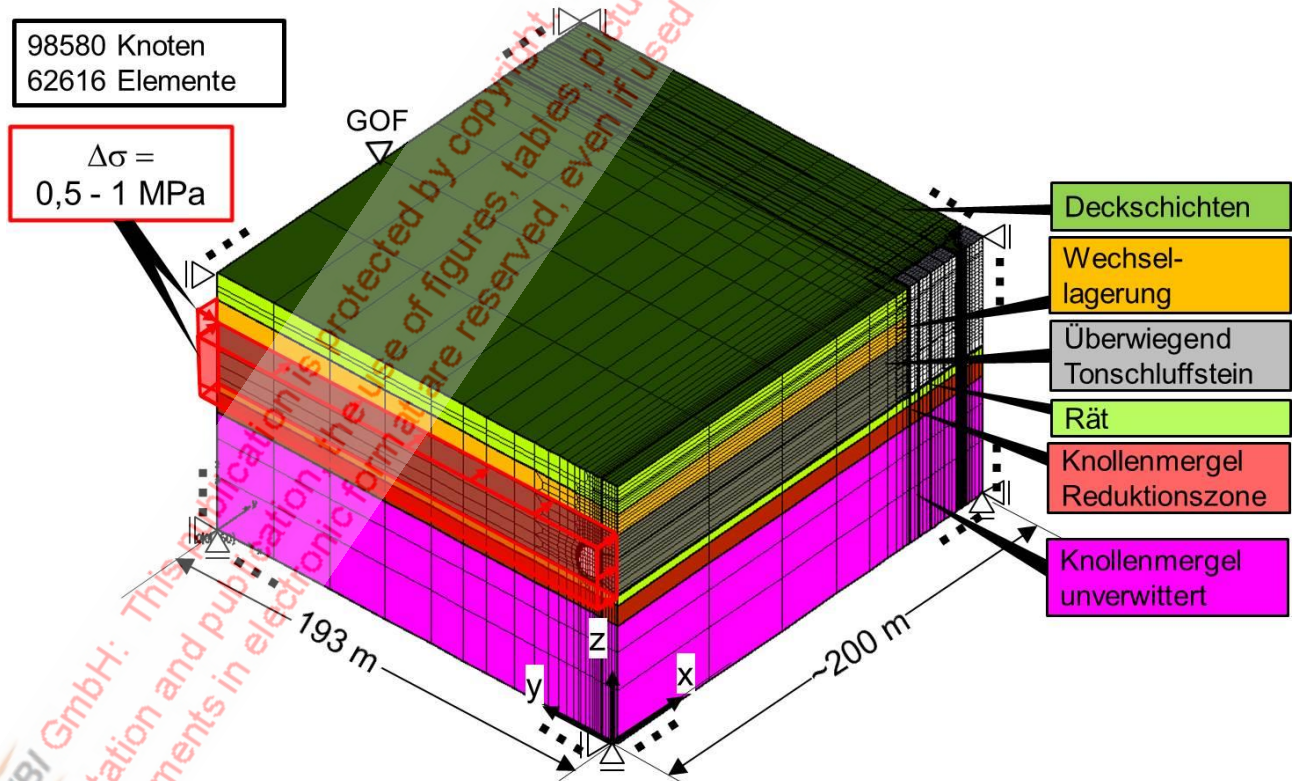
Bild 14: Bauphase 4: Aushub und Sicherung mit Spritzbeton und Ankern des zentralen Schachtes und Sicherung

## 5. Nachweis der Machbarkeit

Die Machbarkeit des vorgesehenen Bauablaufs wurde in dreidimensionalen FE-Berechnungen untersucht. Dabei wurde wegen der erfahrungsgemäß großen Reichweite der Verschiebungen ein sehr großes FE-Netz aufgebaut (Bild 15). In der Längsachse der Technikgebäude und des kreisrunden Schachts und senkrecht dazu in der Mitte des kreisrunden Schachts wurde jeweils eine Symmetrieebene mit den entsprechenden Randbedingungen angenommen (Bilder 15 und 16). Damit wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass das westliche und das östliche Technikgebäude die gleichen Abmessungen haben. Im Bereich der Tonschluffsteinschichten wurden zusätzliche Horizontalspannungen von 0,5 bis 1,0 MN/m<sup>2</sup> berücksichtigt (Bild 15).

Das FE-Netz ist insbesondere in der Nähe der Baugruben sehr feinmaschig und ermöglicht die Simulation des Auffahrens der einzelnen Baugruben, der Stationsröhren und der Übergangsbereiche (Bild 16).

In den Bildern 17 bis 21 sind ausgewählte Berechnungsergebnisse für einen Fall mit zusätzlichen Horizontalspannungen von 1,0 MN/m<sup>2</sup> dargestellt. Nach Abteufen der Baugruben für die Technikgebäude ergibt sich eine Spannungsumlagerung um die Baugruben herum und eine Spannungskonzentration östlich und westlich der Baugruben (Bild 17). Im Nahbereich der Baugruben nehmen die Horizontalspannungen näherungsweise auf Null ab. Nur im Bereich der Steifen verbleiben gewisse Horizontalspannungen auch im Nahbereich der Baugrube.



© Bild 15: FE-Netz, Randbedingungen und Untergrundprofil

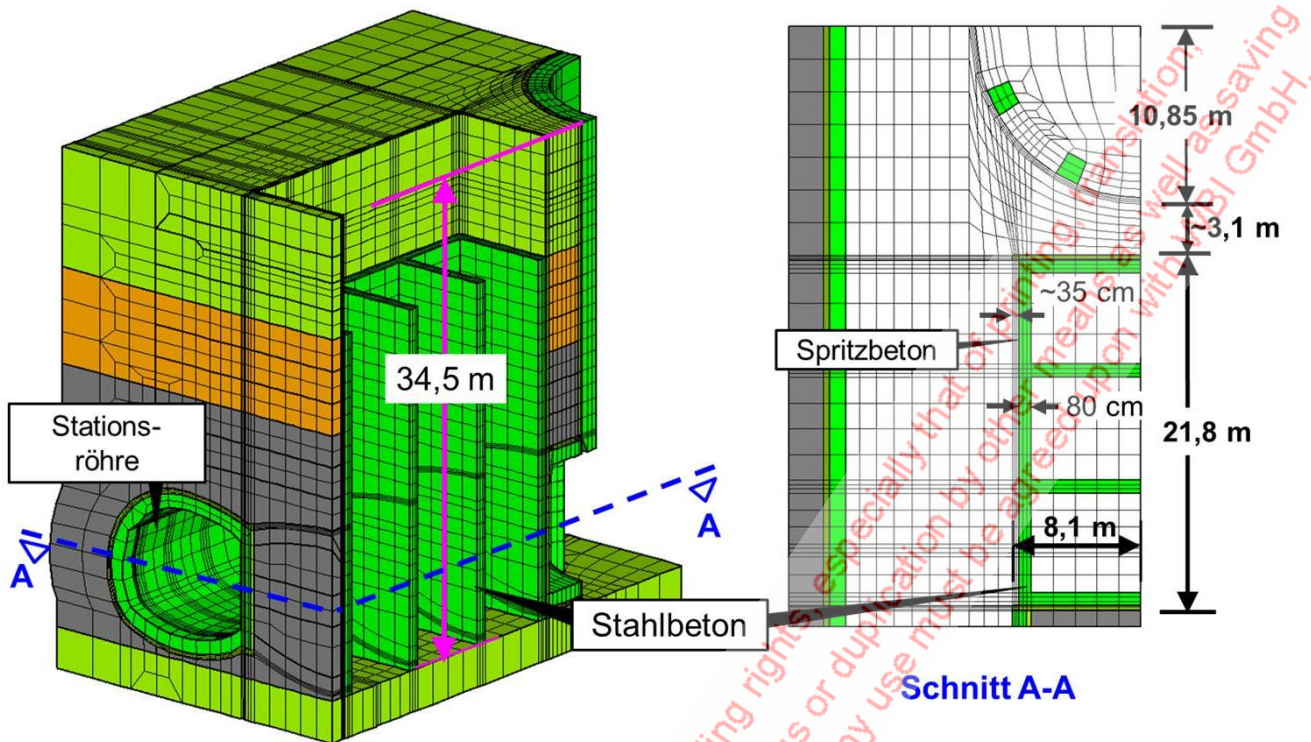


Bild 16: FE-Netz, Detail

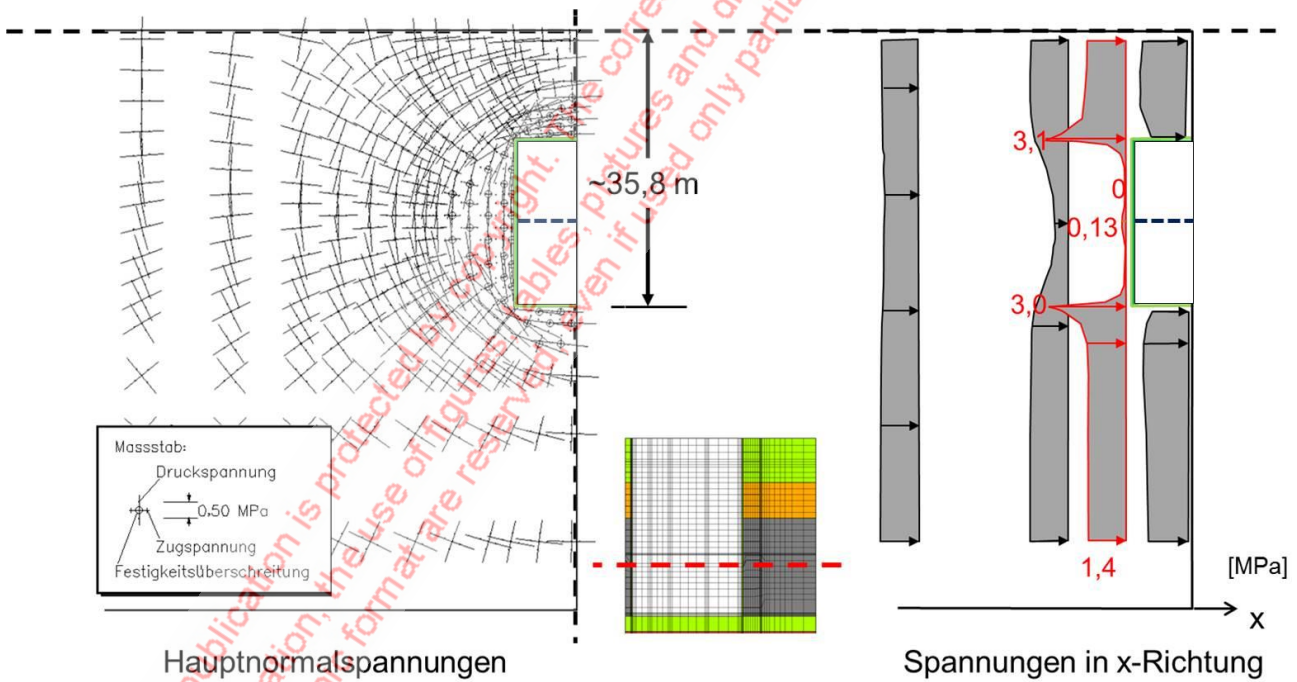


Bild 17: Spannungen im Tonschluffstein nach Aushub und Sicherung der Baugruben für die Technikgebäude

Die Spannungumlagerungen führen zu den auf dem Bild 18 dargestellten Verschiebungen. Es zeigt sich, dass am Baugrubenrand Verschiebungen von bis zu 31 mm errechnet werden, die mit zunehmender Entfernung von der Baugrube deutlich abnehmen.

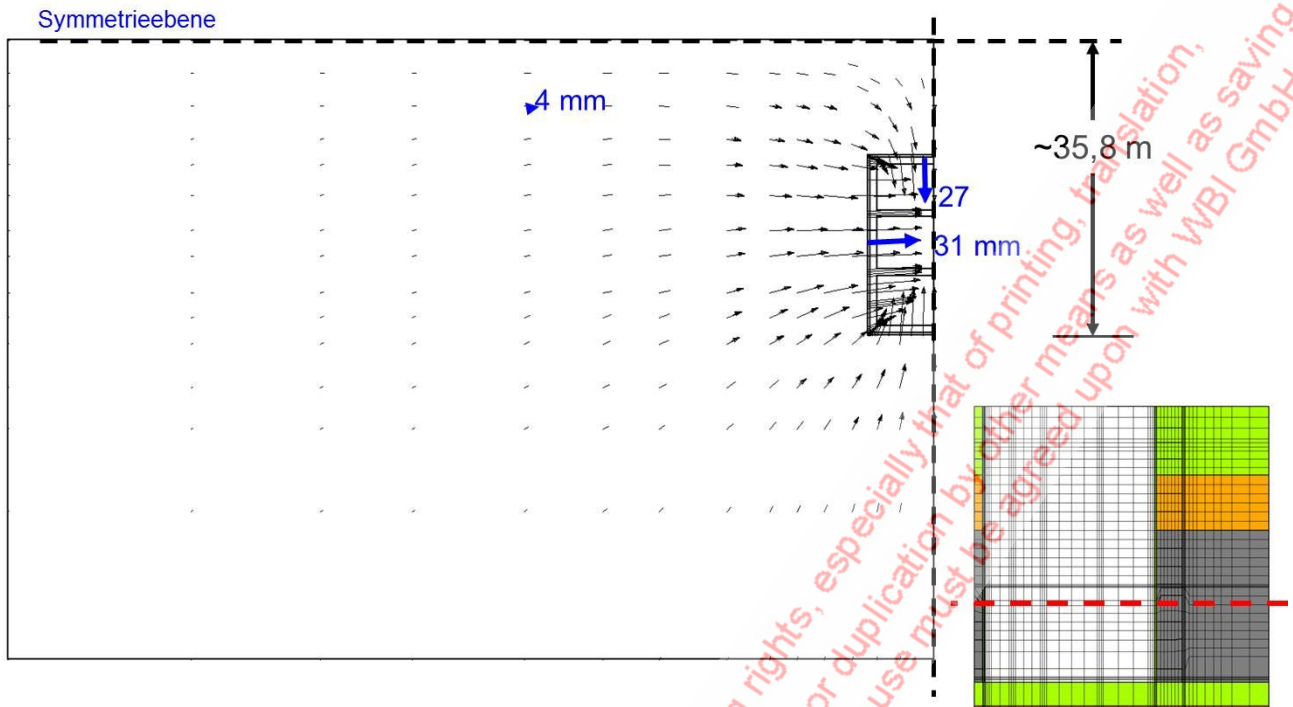


Bild 18: Verschiebungen im Tonschluffstein infolge Aushub und Sicherung der Baugruben für die Technikgebäude

Das Abteufen des kreisrunden Schachtes führt zu einer deutlichen Zunahme der Spannungen in dem zwischen den Technikgebäuden und dem kreisrunden Schacht verbleibenden Gebirgsstöcken (Bilder 17 und 19). Hier ist daher unbedingt auf eine gute Durchankerung und Sicherung zu achten. Auch die bereits eingebauten Stahlbetonwände der Technikgebäude erfahren auf der dem kreisrunden Schacht zugewandten Seite eine deutliche Zunahme der Beanspruchung (Bild 20). Die Berechnungen zeigen allerdings, dass sich die 80 cm dicken Wände für diese zusätzliche Belastung bemessen lassen.

Die Verschiebungen in der Umgebung der Baugruben nehmen bei dem vorgesehenen Bauverfahren nur wenig mit dem Abteufen des kreisrunden Schachtes zu (Bilder 18 und 21).

Würde eine gemeinsame Baugrube für die Technikgebäude und den kreisrunden Schacht abgeteuft werden, so ergäbe sich eine deutlich größere Baugrubenlänge. Dies würde, wie Vergleichsberechnungen gezeigt haben, zu einer deutlichen Zunahme der Verschiebungen führen (Bilder 21 und 22). So ergeben sich aus den Berechnungen maximale Verschiebungen der Baugrubenwand von 11 cm. Auch die Reichweite der Verschiebungen wäre in diesem Fall deutlich größer. In einer Entfernung von ca. 35 m von der Baugrube ergeben sich bei einer gemeinsamen Baugrube rechnerisch Verschiebungen von 22 mm statt 7 mm. Dies zeigt deutlich den positiven Effekt des vorgeschlagenen Bauablaufs.

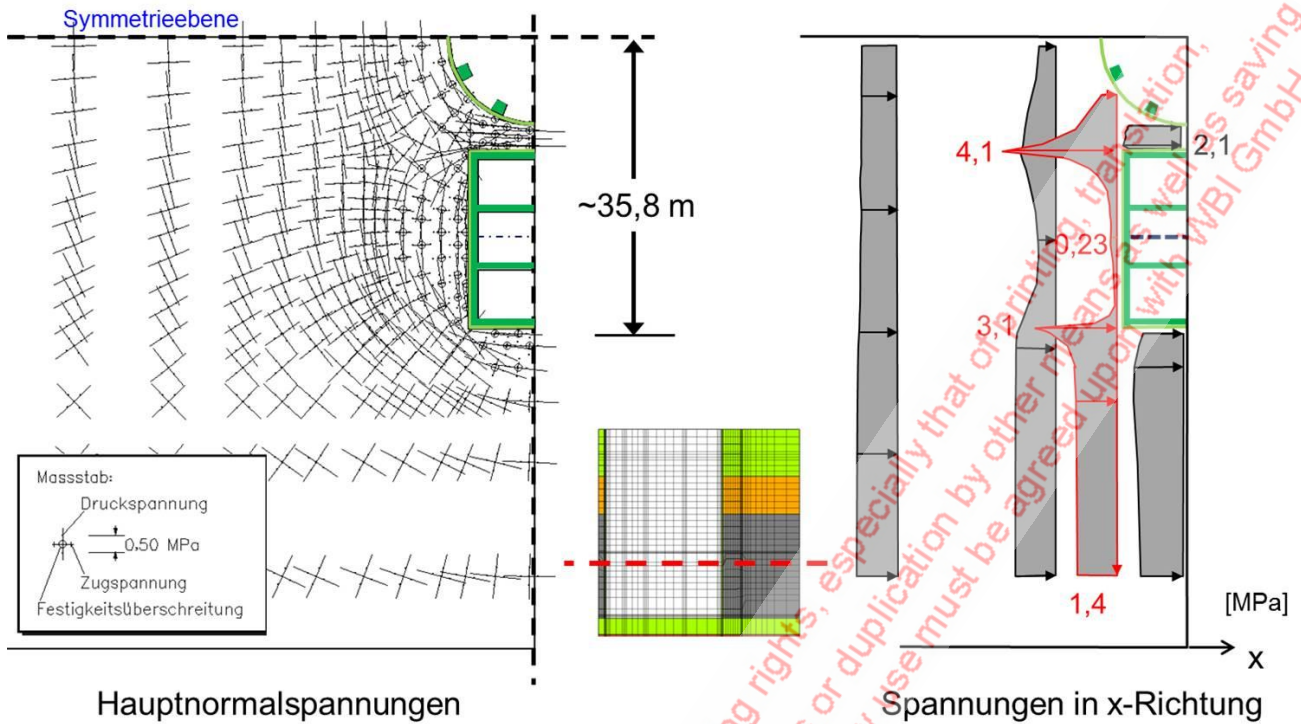


Bild 19: Spannungen im Tonschluffstein nach Aushub und Stahlbetonausbau, Sicherung der Baugruben für Technikgebäude und kreisrunden Schacht

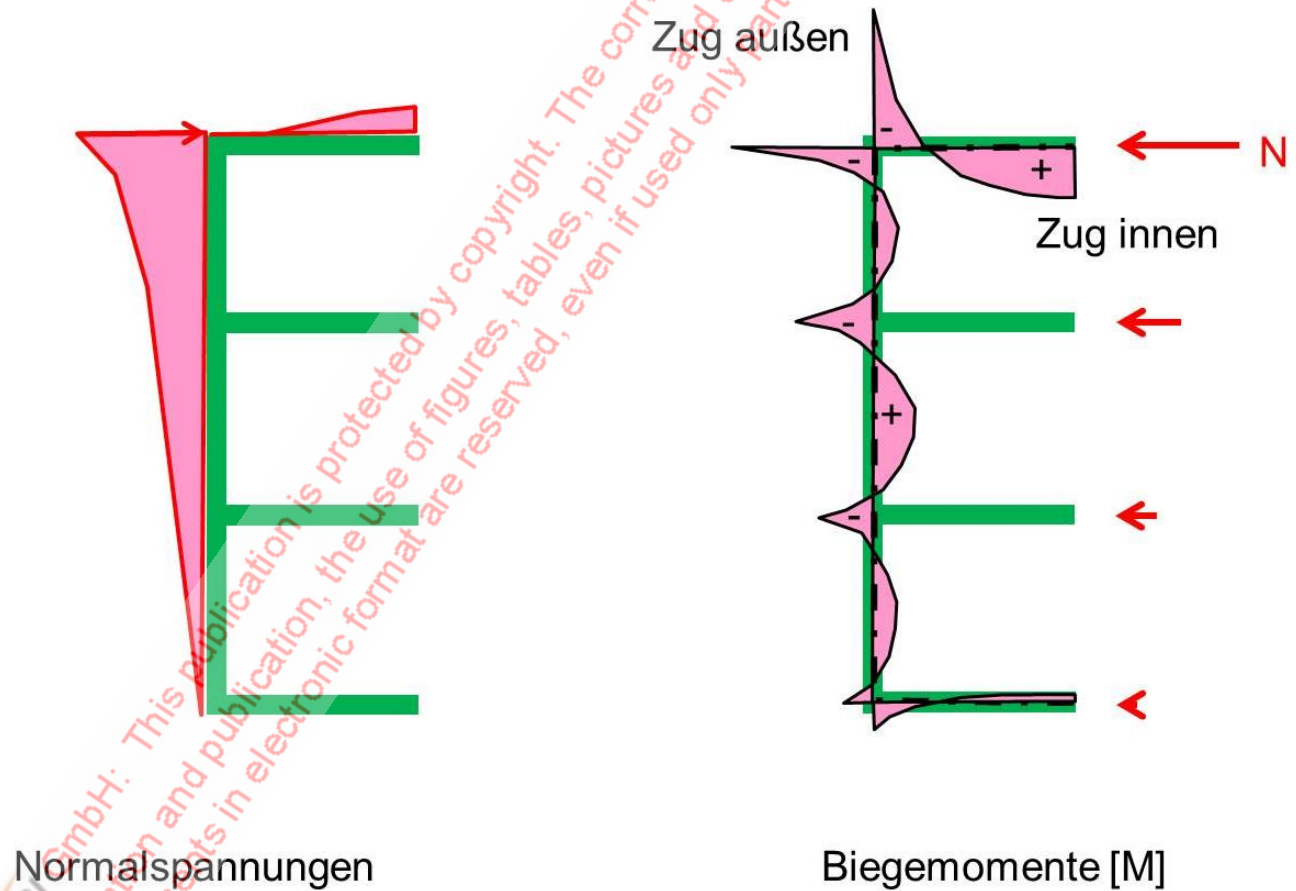


Bild 20: Normalspannungsbeanspruchung und Schnittgrößen Stahlbetonwände

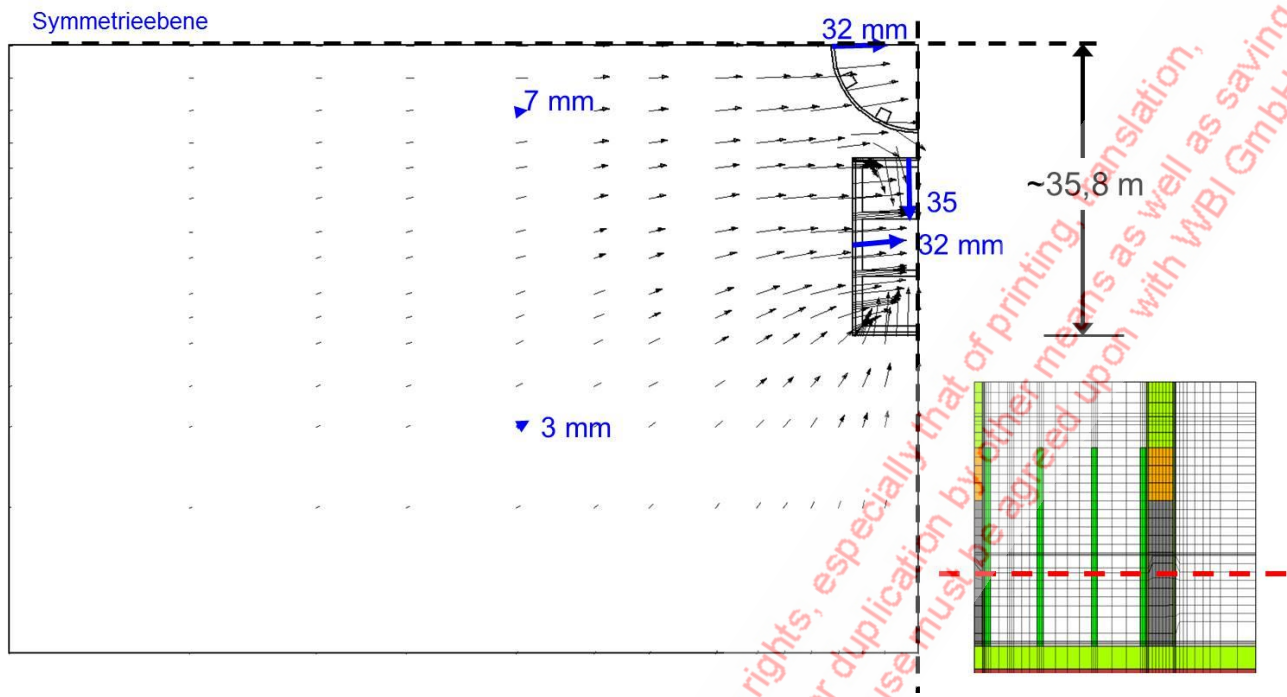


Bild 21: Verschiebungen infolge Aushub und Sicherung der Baugruben für Technikgebäude und kreisrunden Schacht und Stahlbetonausbau der Technikgebäude

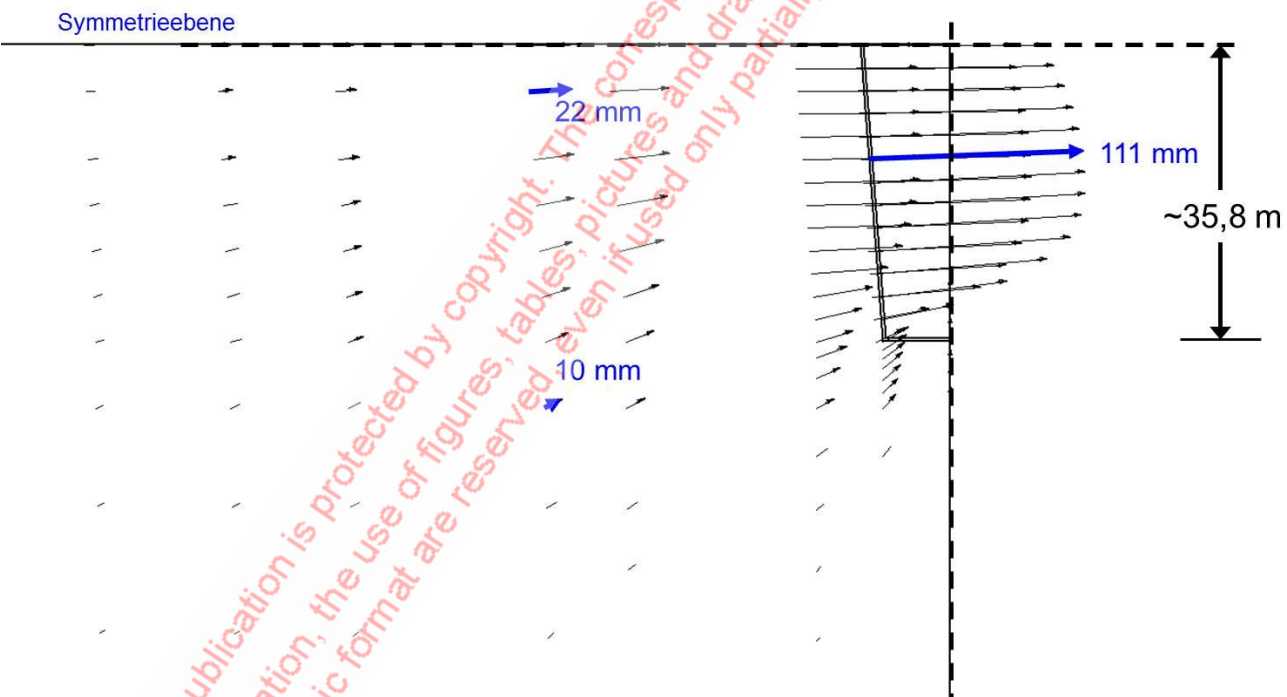


Bild 22: Verschiebungen im Tonschluffstein bei Ausführung einer gemeinsamen Baugrube

**Literatur:**

Wittke, W.: Baugrundverhältnisse des Bahnprojektes Stuttgart – Ulm, Vortrag anlässlich des 1. Felsmechanik-Tages im WBI-Center am 16.4.2015. WBI-Print 18, Weinheim 2015.

© Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2014.

Wittke, W.: Hohe Horizontalspannungen im Jura und ihre bautechnischen Konsequenzen. 9. Nationales Felsmechanik-Symposium in Aachen 1990. Geotechnik Sonderheft 1991.

Wittke, W.; Tegelkamp, M.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke, M.: Tunneling under the Stuttgart airport runway. World Tunneling, Oct. 2003.

LGRB: Geologische Übersichtskarte, 1 : 300.000, 2013.

LGRB: Geologische Karte von Baden-Württemberg, 1 : 25.000, Blätter 7120, 7121, 7220, 7221, Stuttgart.

Grüter, R.: Erkundung des Spannungszustandes in den Schichten des Schwarzjura durch einen Großversuch bei der S-Bahn zum Flughafen Stuttgart-Echterdingen. Vortrag, gehalten auf dem 8. Nationalen Felsmechanik-Symposium in Aachen 1988, Geotechnik Sonderheft 1988.

Böttcher, K.-H.; Schmidt, I.; Erichsen, C.: S-Bahn Stuttgart - Streckenverlängerung vom Flughafen nach Filderstadt-Bernhausen - Die Untertunnelung des Flughafens. Vortrag zur Baugrundtagung, Stuttgart, 1998.