# Baugruben und Tunnelbau in offener Bauweise

## I. Flughafentunnel – Hohlraumbau in vorbelasteten Tonsteinen des Lias α

**Martin Wittke, Patricia Wittke-Gattermann, Meinolf Tegelkamp, Robert Berghorn, Axel Hillebrenner**

*Zur Anbindung des Flughafens Stuttgart an die Neubaustrecke Stuttgart – Ulm wird der 2,2 km lange Flughafentunnel mit der Station NBS in Spritzbetonbauweise gebaut. Dabei werden u. a. die Autobahn A8, zwei Hallen der Messe Stuttgart, das Kongresszentrum ICS, der Flughafenentlastungstunnel sowie zwei Hotels und drei Parkhäuser unterfahren. Die beiden Zugänge zur Station werden über Schachtbauwerke realisiert. Im Bereich des Zentralen Zugangs werden außerdem in sehr geringem Abstand zum zentralen runden Zugangsschacht zwei große Technikgebäude als Schachtbauwerke hergestellt. Die Tunnel und Schächte liegen in den gesteinsfesten Schichten (Fels) des unteren Schwarzen Jura (Lias α). In den Tonsteinen dieser Formation sind horizontale Primärspannungen vorhanden, die größer sind, als es sich nach der üblichen Betrachtungsweise aus dem Gewicht der heutigen Überlagerung und der Berücksichtigung des Seitendruckbeiwertes der Tonsteine ergibt.*

*Diese und die Schichtung und Klüftung sind für die Standsicherheit und die Verformungsprognose wesentlich. Die Nachweise und Prognosen werden nach der AJRM-Methode mithilfe von räumlichen FE-Berechnungen ausgeführt. Besondere Herausforderungen an die Berechnungen und die darauf basierende Ausführungsplanung stellt der Bereich der Zentralen Zugangsanlage dar. Die geometrischen Verhältnisse und die vorliegenden geotechnischen Randbedingungen mit den zusätzlichen Horizontalspannungen in den Tonsteinen erfordern einen besonderen Bauablauf, um unzulässig große Verschiebungen im Umfeld der Zugangsanlage zu vermeiden und um die Standsicherheit in jeder Bauphase zu gewährleisten.*

*Tunnelbau 2022*, Herausgegeben von der DGGT, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.
*© 2022 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2022 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.*

*Mit Stand Mai 2021 wurden bereits große Abschnitte der bergmännischen Tunnelröhren der westlichen Zulaufstrecke zur Station erfolgreich aufgefahren. Die angetroffenen geotechnischen Verhältnisse und die gemessenen vortriebsbedingten Verformungen bestätigen in vollem Umfang die Prognosen und die Ansätze zu den charakteristischen Kennwerten und Primärspannungszuständen. Auch die Arbeiten im Bereich der Station laufen planmäßig und ohne Überraschungen. Die Baumaßnahme wird durch ein umfangreiches Monitoring mit Messungen über- und untertage sowie an benachbarten Gebäuden, Anlagen und Verkehrswegen begleitet. Ein wesentliches Instrument stellt dabei die Aufbereitung und Veranschaulichung der sehr umfangreichen Bau- und Messdaten mithilfe des von WBI entwickelten BIM-Systems (WBIM) dar.*

**Airport tunnel – Cavity construction in pre-loaded claystone of Lias α**

*In order to connect the airport Stuttgart to the new highspeed railway line from Stuttgart to Ulm, the 2.2 km long airport tunnel including the underground station are being constructed by means of the CTM-method. The tunnels undercross the highway A8, the fair and congress center of Stuttgart as well as several hotels and parking garages. The two access points to the underground station will be realized by deep shafts. Adjacent to the central access shaft in addition two technical buildings are being constructed inside two additional shafts. The tunnels and shafts are mostly located in rocks of the Black Jurrassic. The claystones of this formation contain increased horizontal in-situ stresses, which are considerably larger than resulting from the weight of the overburden.*

*The increased in-situ stresses as well as bedding and jointing of the rock are decisive for the stability analyses and the prediction of the displacements. The corresponding analyses are carried out following the AJRM method by means of 3D-FE-analyses. Special considerations have to be made for the very complex central access to the station and the adjacent technical buildings. The geometrical constraints and the rock mechanical conditions require a tailor-made sequence of construction in order to limit the displacements and achieve stability in each stage of construction.*

*Already, by the end of May 2021 larger parts of the CTM-tunnels had been excavated successfully. The geotechnical conditions and the results of monitoring are in good agreement with the predictions for characteristic parameters and horizontal in-situ stresses. Also the works at the underground station proceed well without surprises. Construction is accompanied by a vast monitoring program, consisting of displacement and stress monitoring underground, above*

WIR MACHEN KEINE
HALBEN SACHEN - AUSSER BEI

# HALBOFFENEN BAUWEISEN!

ALFRED KUNZ
HEGEMANN CONSTRUCTION

IHR PARTNER IM TUNNELBAU.

www.alfredkunz.de

*ground and at adjacent structures. An important element of this system is the adequate representation and evaluation of the results, which is being carried out by the BIM-system WBIM developed by WBI.*

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Infrastrukturprojekts Stuttgart 21 wird zur Anbindung des Flughafens Stuttgart an die Neubaustrecke (NBS) Stuttgart – Ulm im Planfeststellungsabschnitt (PFA) 1.3a der Flughafentunnel mit der Station NBS) hergestellt (Bild 1). Die in Bild 1 ebenfalls dargestellte Flughafenkurve (PFA 1.3b) wird noch nicht erstellt.

Die beiden Gleise der NBS werden nördlich der Bundesautobahn (BAB) A8 aus der dort parallel zur Autobahn verlaufenden freien Bahnstrecke ausgefädelt und unterqueren dann in zwei eingleisigen bergmännischen Tunnelröhren zunächst die BAB und danach den Bereich der Messe Stuttgart. Im mittleren Abschnitt der ca. 2,2 km langen Tunnelstrecke wird die etwas über 400 m lange Station NBS ebenfalls in bergmännischer Bauweise mit zwei nebeneinanderliegenden Bahnsteigröhren aufgefahren. Die Zugänge zur Station aus dem Bereich Messe/Flughafen werden über Schachtbauwerke realisiert. Nach Osten hin schließen sich an die Station wieder zwei eingleisige bergmännische Tunnelröhren an. Für die östliche Unterquerung der Autobahn werden die Tunnelquerschnitte in zwei Bauphasen in offener Bauweise ausgeführt. Dazu wird die BAB A8 temporär nach Norden verschwenkt und anschließend in ihre alte Lage zurückverlegt.

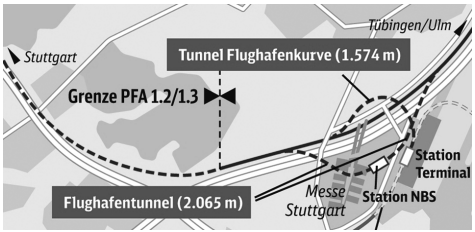


**Bild 1.** Übersicht Flughafenanbindung im PFA 1.3 [1]

# Integrative Lösungen für komplexe Projekte

www.ic-group.org

Die in bergmännischer Bauweise aufzufahrenden Tunnelröhren der westlichen und der östlichen Zulaufstrecken sowie die Bahnsteigröhren der Station verlaufen in den gesteinsfesten Schichten des Lias α, der den unteren Teil des Schwarzen Juras bildet. Es handelt sich hier um Ton-, Schluff- und Kalk-/Sandsteine, die im oberen Abschnitt in Form einer Wechsellagerung anstehen. Darunter folgt bis zum Übergang zu den unterlagernden Keuperschichten (Rät und Knollenmergel) eine Zone, die fast ausschließlich aus Tonsteinen besteht. Infolge der geologischen Vorbelastung sind in den Tonsteinen des Lias α deutlich erhöhte horizontale Primärspannungen wirksam, die bei der Planung und beim Bau der untertägigen Hohlräume von Bedeutung sind.

Im Weiteren wird vornehmlich auf die besonderen Fragestellungen und Herausforderungen bei der Planung und der Bauausführung eingegangen, die sich beim Hohlraumbau für den Flughafentunnel und die Station in den vorbelasteten Tonsteinen des Lias α ergeben. Dabei werden die umfangreichen Erfahrungen genutzt, die bei im Raum Stuttgart in den entsprechenden Schichten des Schwarzen Juras erfolgreich realisierten Projekten gesammelt wurden.

## 2 Bauvorhaben

Der innerhalb des PFA 1.3a liegende Flughafentunnel ist Bestandteil der Vergabeeinheit Rohbau Flughafenanbindung Los 1, mit deren Ausführung die Arbeitsgemeinschaft (Arge) Neubaustrecke – Flughafentunnel (Züblin/Bögl/Strabag) 2019 von der DB Projekt Stuttgart–Ulm GmbH (DB PSU) beauftragt wurde. Die Bauausführung wurde Anfang 2020 aufgenommen. Mit den bergmännischen Tunnelvortriebsarbeiten der westlichen Zulaufröhren konnte bereits im Juni 2020 begonnen werden. Die WBI GmbH ist bei dem Projekt als Gutachter und Sachverständiger für Baugrund und Tunnelbau für die DB PSU tätig und begleitet die Ausführung auch als Fachbauüberwachung vor Ort. Die Ausführungsplanung für die Zulaufstrecken und das Entrauchungsbauwerk Mitte sowie die Schal- und Bewehrungsplanung der Innenschalen wird von der Zentrale Technik der Firma Züblin erstellt. Die WBI GmbH bearbeitet im Auftrag der Arge Teile

CDM Smith®
listen. think. deliver.

Nachhaltige Lösungen weltweit

cdmsmith.com

BERATUNG · PLANUNG · BAUBEGLEITUNG · PROJEKTSTEUERUNG

Achim Hettler, Karl-Eugen Kurrer

Erddruck

- Sammlung von Arbeitsanleitungen und Anwendungshinweisen
- Kommentar zur DIN 4085
- historische Aufarbeitung der Entwicklung der Erddrucktheorie
- umfassende und konkurrenzlose Darstellung

BESTELLEN
+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3274

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

2019 · 394 Seiten · 261 Abbildungen · 14 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-03274-9
€ 89*

eBundle (Print + PDF)
ISBN 978-3-433-03275-6
€ 79*

Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

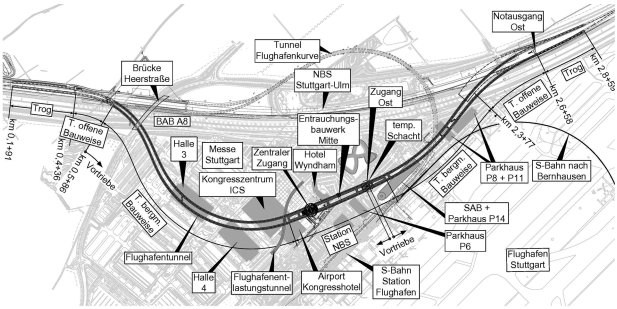


**Bild 2.** Lageplan Flughafentunnel mit Station NBS

der Ausführungsplanung, die die Stationsröhren mit den Verbindungsbauwerken und das zentrale Zugangsbauwerk untertage betreffen. Die Ausführungsplanung für Ausbruch und Sicherung des Zugangs Ost wurde von der DB PSU als vorgezogene Ausführungsplanung zur Verfügung gestellt und während der Ausführung von der Arge und von WBI optimiert.

In Bild 2 ist der Flughafentunnel mit der Station NBS im Lageplan dargestellt. Die aus den nördlich der Autobahn A8 im Freien verlaufenden Teilen der NBS Stuttgart – Ulm ausgefädelten Gleise verlaufen sowohl im Westen als auch im Osten zunächst in Trogbauwerken, bis sie nach Erreichen ausreichender Tieflage jeweils in die Tunnelabschnitte in offener Bauweise überführt werden können. Der Verlauf der Gradiente ist dem überhöhten Längsschnitt entlang des südlichen Gleises von Stuttgart Richtung Ulm in Bild 3 zu entnehmen.

Im Westen endet die offene Tunnelbauweise (Baugrube) am Nordrand der BAB A8. Die Autobahn wird dann bereits mit den beiden eingleisigen Röhren der Zulaufstrecke West bergmännisch unterfahren. Es handelt sich hierbei um Tunnelquerschnitte mit einem Kreisprofil, deren Regelquerschnitt in Bild 4 dargestellt ist. Der lichte Durchmesser der mit einer Stahlbetoninnenschale ausgekleideten Röhren beträgt 8,10 m. Nach der Unterfahrung der BAB wird die

www.BPA-waterproofing.com

BPA
WATERPROOFING SYSTEMS

100% DICHT HALTEN

Hochtechnische Abdichtungslösungen für Gebäude, Tunnel und Fundamente. Weltweit im Einsatz.

**BPA GmbH** | Behringstraße 12 | 71083 Herrenberg
TEL +49 (0)7032 89 399-0 | info@BPA-waterproofing.com

Bernhard Maidl, Martin Herrenknecht, Ulrich Maidl, Gerhard Wehrmeyer

**Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb**

- **neue Auflage, komplett überarbeitet und aktualisiert**
- **Übersicht zu Einsatzgebieten und Anwendungsgrenzen moderner Tunnelvortriebsmaschinen**

**BESTELLEN**
**+49 (0)30 470 31-236**
**marketing@ernst-und-sohn.de**
**www.ernst-und-sohn.de/2948**

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

2., vollst. überarb. u. erw. Auflage · 2011 · 492 Seiten · 468 Abbildungen · 44 Tabellen

Hardcover
**ISBN 978-3-433-02948-0**
**€ 119***

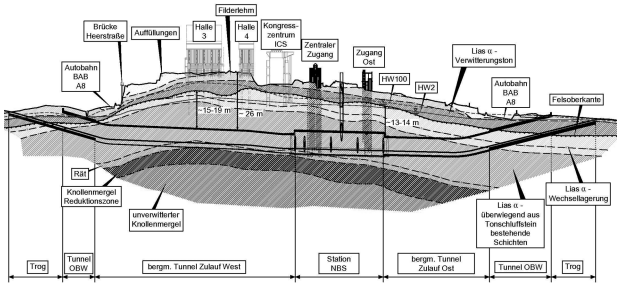


**Bild 3.** Geologisch-geotechnischer Längsschnitt Flughafentunnel (überhöht)

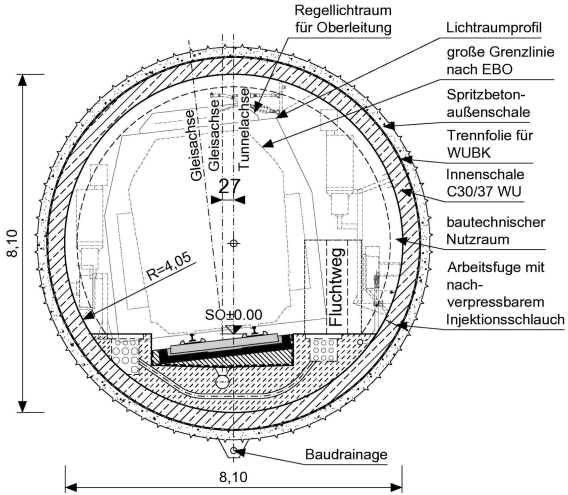


**Bild 4.** Regelquerschnitt Zulaufröhren

Brücke Heerstraße (L 1192) unterfahren, wobei mit der Südröhre das Brückenwiderlager in geringem Abstand unterquert wird.

Die beiden Tunnelröhren der Zulaufstrecke West verlaufen im Anschluss unter dem Gelände der Messe Stuttgart. Nach der Unterfahrung des Ausstellungsfreigeländes gelangen die Tunnelquerschnitte unter die beiden Messehallen 3 und 4. In Bild 5 ist beispielhaft die Situation bei der Unterfahrung der Messehalle 3 dargestellt. Die Standardhallen der Messe besitzen im Querschnitt jeweils ein frei gespanntes Hängedach, das seine Lasten in A-förmige, auf großen Einzelfundamenten gegründete Stützen einträgt. An den Fundamenten sind auf der äußeren Seite vorgespannte Daueranker angeordnet, über die aus den Dachlasten resultierende Zugkräfte nach unten in den Fels des Lias α eingetragen werden. Die Tunnelvortriebe müssen so durchgeführt und messtechnisch überwacht werden, dass keine unzulässigen Senkungen und Verdrehungen der Hallengründungen eintreten.

Auch das zur Messe Stuttgart gehörige internationale Kongresszentrum ICS wird mit den beiden Tunnelröhren unterfahren. Unter dem Kongressbereich befinden sich zwei Untergeschosse (UG), sodass der vertikale Abstand der Tunnelquerschnitte zur ICS-Gründung nur

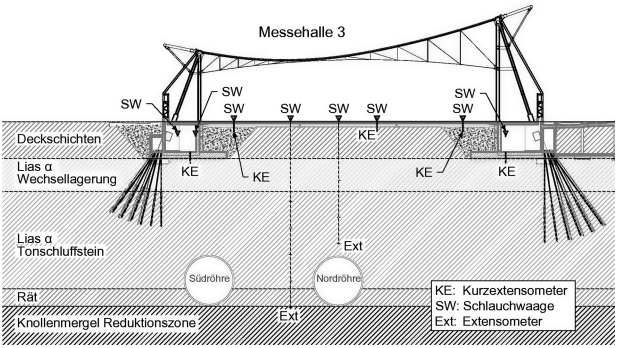


**Bild 5.** Unterfahrung einer Messehalle

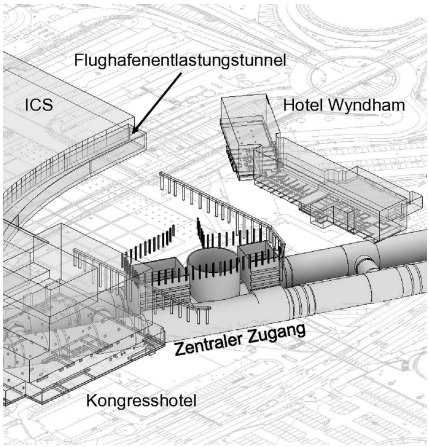


**Bild 6.** Ausschnitt aus dem 3D-Modell (BIM)

noch ca. 11 – 12 m beträgt. Im Niveau des 2. UG des ICS verläuft außerdem angrenzend ein Straßentunnel, der sogenannte Flughafenentlastungstunnel, der im Rahmen des Baus der neuen Messe Stuttgart errichtet wurde (siehe Bilder 2 und 6). Dieser Tunnel ist durch den südöstlichen Eckbereich des ICS überbaut, sodass sich hier eine komplexe Bestandssituation ergibt. Hinzu kommt, dass in diesem Bereich die beiden eingleisigen Tunnelröhren der Zulaufstrecke West in die beiden Stationsröhren übergehen und kurz vor dem Erreichen des Stationsbereiches das sogenannte Schwallbauwerk West als Querschlag zwischen den beiden Tunnelröhren aufgefahren wird. Die beiden Schwallbauwerke westlich und östlich der Station dienen jeweils dem Druckausgleich beim Einfahren der Züge über die Zulaufstrecken.

Der Regelquerschnitt der Stationsröhren mit dem sogenannten Bahnsteigquerschnitt ist in Bild 7 dargestellt. Die lichte Breite des als Maulprofil konzipierten Querschnitts beträgt 11,40 m und auch die lichte Höhe ist mit fast 10 m größer als bei den Zulaufröhren. Die Bahn-

steige in den beiden parallel verlaufenden Stationsröhren werden jeweils auf der Seite des dazwischenliegenden Gebirgspfeilers angeordnet. Zusätzlich zu den Querverbindungen im Bereich der beiden Zugänge zur Station von über Tage (Zentraler Zugang und Zugang Ost) werden in den Bahnsteigbereichen insgesamt fünf begehbare Verbindungsbauwerke hergestellt. Die Entrauchung des Stationsbereichs im Brandfall erfolgt in den Röhren über Entrauchungskanäle oberhalb der Bahnsteige. Diese Kanäle werden sowohl am Zentralen Zugang (ZZ) und als auch am Zugang Ost (ZO) an schachtartige Entrauchungsbauwerke angeschlossen. Dazwischen wird zusätzlich das Entrauchungsbauwerk Mitte hergestellt. Dabei handelt es sich um ein Schachtbauwerk über der nördlichen Stationsröhre, an das der Entrauchungskanal der Südröhre über einen Querstollen angeschlossen wird.

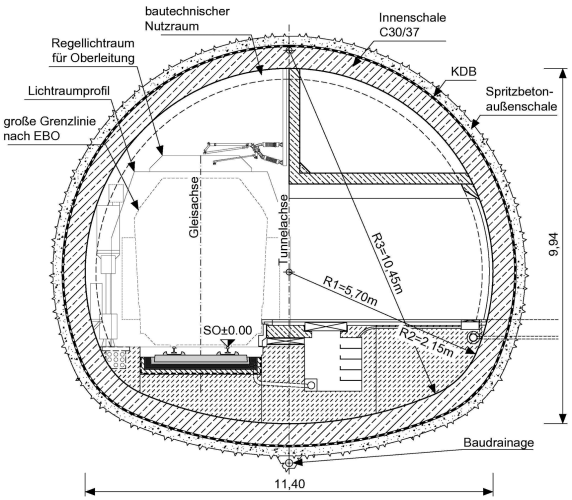


**Bild 7.** Regelquerschnitt Stationsröhren

Die zentrale Zugangsanlage umfasst neben dem mittig angeordneten großen Rundschacht mit einem lichten Durchmesser von nahezu 20 m die beiden Technikgebäude West und Ost. Diese Technikgebäude werden ausgehend vom Niveau der Geländeoberfläche bis zum Niveau der Bahnsteigebene zwischen den Stationsröhren als große Rechteckschächte ausgeführt. Zwischen dem zentralen Rundschacht und den Technikschächten verbleibt dabei nur ein geringmächtiger Gebirgspfeiler. Die zentrale Zugangsanlage bildet in ihrer Gesamtheit aus drei großen, eng beieinanderliegenden Schachtbauwerken und den unmittelbar angrenzenden Stationsröhren mit den daraus resultierenden Verschneidungen ein komplexes räumliches Bauwerk. Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an die Planung und die Ausführung. In Bild 8 ist ein Teil des dazu gemeinsam von WBI und der Zentrale Technik erstellten 3D-BIM-Modells (BIM: Building Information Modeling) dargestellt, in dem die wesentlichen Bauwerksstrukturen erkennbar sind.

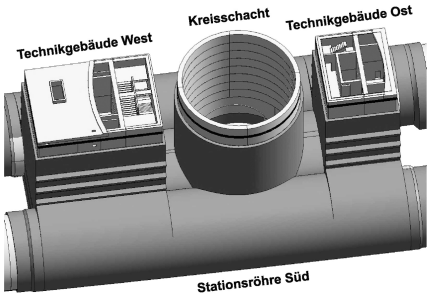


**Bild 8.** Zentraler Zugang, 3D-Modell

Bild 9 zeigt in einer perspektivischen Sicht aus der Bahnsteigebene den Verschneidungsbereich zwischen den Schachtbauwerken und den Stationsröhren. Das gesamte 3D-Modell umfasst auch die Untergrundschichten und ermöglicht die Übernahme für die rechnerische Simulation des zur Herstellung des Zentralen Zugangs erforderlichen Bauablaufs. Aus statisch-konstruktiven Gründen werden zunächst von der Sohle einer in den Lockergesteinsdeckschichten liegenden

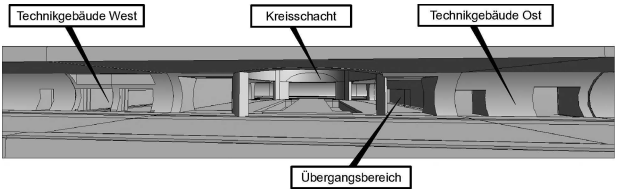


**Bild 9.** Zentraler Zugang, 3D-Modell, Verschneidung Schacht/Stationsröhren

großen Baugrube am ZZ die beiden Rechteckschächte für die Technikgebäude in der Spritzbetonbauweise abgeteuft und im Anschluss mit einer Stahlbetonkonstruktion ausgekleidet. Erst danach wird der zentrale Rundschacht von der Geländeoberfläche (GOF) aus abgeteuft und ebenfalls mit einer Stahlbetoninnenschale ausgebaut. Die Stationsröhren werden nach entsprechender Herstellung der Schachtbauwerke von Osten her vorgetrieben und an die vertikal orientierten Bauwerke angeschlossen bzw. mit diesen verschnitten.

Das Stahlbetonbauwerk für den Zugang Ost der Station wird in offener Bauweise hergestellt. Die Baugrube wird aus logistischen Gründen als großer temporärer Rundschacht mit einem Durchmesser von ca. 45 m und einer Endtiefe von etwa 35 m ausgeführt. Der große Schachtdurchmesser ermöglicht es, den Vortrieb der beiden Stationsröhren von diesem Angriffspunkt aus gleichzeitig in westliche und östliche Richtung durchzuführen. Im Westen trifft der vom temporären Schacht ausgehende Vortrieb dann nach der Passage der zentralen Zugangsanlage auf den entgegenkommenden Tunnelvortrieb, der nördlich der BAB A8 aus der Baugrube der offenen Bauweise West gestartet wurde (vgl. Bild 2). Die bergmännischen Tunnelröhren der Zulaufstrecke Ost werden fast vollständig vom temporären Schacht am Zugang Ost aus aufgefahren. Aus der Baugrube des Tunnels Ost wurde nur ein sehr kurzer bergmännischer Gegenvortrieb geplant und ausgeführt. Damit kann später eine geordnete Durchschlagsituation im Berg gewährleistet werden, während die anschließenden in offener Bauweise erstellten Tunnelblöcke Ost zu diesem Zeitpunkt bereits hergestellt und eingeschüttet wurden.

Für das Entrauchungsbauwerk Mitte der Station wird zunächst der Schacht im Bereich der Nordröhre abgeteuft und gesichert. Der mit seinem unteren Teil im Kalottenniveau der Stationsröhren liegende Querstollen wird anschließend vom Schacht aus vorgetrieben. Die Vortriebe der beiden Stationsröhren erreichen die zuvor ausgebrochenen und gesicherten Hohlräume des Entrauchungsbauwerks erst später. Auch im Bereich des Entrauchungsbauwerks Mitte liegen komplexe räumliche Verhältnisse vor, die durch Verschneidungen gekennzeichnet sind. Auch hier spielt der Bauablauf eine wesentliche Rolle beim Nachweis der Standsicherheit und der Dimensionierung der Sicherungsmittel.

Bei Erstellung der Stationsröhren als Kalottenvortrieb mit temporärem Sohlgewölbe und nachlaufenden Strossen-/Sohlvortrieben sind mehrere bestehende Gebäude zu unterfahren (Bild 2). Von Westen kommend gelangt der Vortrieb der südlichen Stationsröhre nach der Unterquerung des Flughafenentlastungstunnels unter den Eckbereich des neuen Airport Kongresshotels. Zwischen den beiden Zugangsanlagen der Station liegt das Hotel Wyndham oberhalb der Bahnsteigröhren, zwischen denen hier außerdem eines der Verbindungswerke errichtet wird (Bild 6). Das Parkhaus P14, das in der Erdgeschossebene als Busterminal (SAB) ausgebildet ist, liegt im Stationsbereich noch südlich der Tunnelbauwerke, nach dem bergmännischen Vortrieb der Zulaufstrecke Ost aber auch über den Tunnelröhren. Im Unterschied zu den beiden im Folgenden noch mit der Zulaufstrecke Ost zu unterfahrenden Parkhäusern P8 und P11 ist der Gebäudekomplex SAB/P14 auf rasterförmig angeordneten Bohrpfählen gegründet, die in den Fels des Lias α einbinden.

## 3 Baugrundverhältnisse

### 3.1 Schichtenfolge und Grundwasser

Der Aufbau des Untergrunds im Bereich des Flughafentunnels und der Station NBS ist in Bild 3 in einem überhöhten geologisch-geotechnischen Längsschnitt dargestellt (aus [2]). Alle bisher bei der Bauausführung angetroffenen Verhältnisse bestätigen dabei vollumfänglich

die im Tunnelbautechnischen Gutachten [2] prognostizierten Untergrundverhältnisse und angenommenen Eigenschaften.

Die bergmännischen Vortriebsabschnitte der Tunnelröhren und die unteren Bereiche der Schächte liegen fast vollständig in den gesteinsfesten Schichten des Lias α (unterer Schwarzjura). Nur in Teilabschnitten der westlichen Zulaufröhren und im sich daran anschließenden Bereich der Stationsröhren werden die fast ausschließlich aus Feinsandstein bestehenden Schichten des Rät (oberer Keuper) angeschnitten. Der darunter folgende Knollenmergel des Keuper gelangt nur in der westlichen Zulaufstrecke vorübergehend in den Basisbereich der Tunnelquerschnitte. Es handelt sich dabei um die sogenannte Reduktionszone des Knollenmergels, die durch mürbe Schluffsteine gekennzeichnet ist.

Die Schichten des Lias α werden nach der geologischen Bezeichnung von unten nach oben in die Psilonotenschichten (Lias α1), die Angulatenschichten (Lias α2) und die Arietenschichten (Lias α3) unterschieden. Die unteren Grenzen werden jeweils durch markante Leithorizonte in Form geringmächtiger Bänke aus Kalk-/Sandsteinen gebildet (Psilonotenbank, Oolithenbank und Kupferfelsbank). Aus felsmechanischer und bautechnischer Sicht hat sich bei den zahlreichen bereits im Stuttgarter Raum ausgeführten Projekten für den Lias α eine von der oben genannten stratigrafischen Zuordnung abweichende Einteilung bewährt. Danach unterscheidet man das untenliegende, überwiegend aus Tonsteinen bzw. Tonschluffsteinen bestehende Schichtpaket von den obenliegenden, aus einer Wechsellagerung von Kalk-/Sandsteinen und Tonschluffsteinen bestehenden Schichten. Die Grenze bildet die Unterkante des sogenannten Hauptsandsteins, die, bezogen auf die stratigrafischen Einheiten, etwa in der Mitte der Angulatenschichten (Lias α2) liegt.

Die Längsschnittdarstellung in Bild 3 zeigt diese geotechnische Untergliederung des gesteinsfesten Lias α. Es ist erkennbar, dass die Querschnitte des Flughafentunnels fast ausschließlich in dem überwiegend aus Tonsteinen aufgebauten Schichtpaket verlaufen. Nur im östlichen Bereich der Zulaufstrecke Ost durchfahren die bergmännischen Tunnelabschnitte mit der ansteigenden Gradiente auch die Schichten der

Wechsellagerung. Die oberhalb der Felsoberkante anstehenden Schichten des sogenannten Lias α-Verwitterungstons gehören im Ausgangszustand der Wechsellagerung an. Hier sind die Tonsteine fast vollständig verwittert und entfestigt und liegen meist als mittelplastische Tone mit halbfester Konsistenz vor. Dazwischen sind verwitterungsresistente Kalk-/Sandsteinlagen quasi schwimmend eingelagert.

Oberhalb der Verwitterungszone des Lias α folgen in unterschiedlicher Mächtigkeit die quartären Schichten des Filderlehms und künstliche Auffüllungen bzw. durch anthropogene Eingriffe umgelagerte Böden. Auf diese Deckschichten aus Lockergesteinen wird im Folgenden nicht näher eingegangen.

Der geschlossene Grundwasserspiegel liegt im unbeeinflussten Zustand entlang des Flughafentunnels und der Stationsröhren deutlich oberhalb der Tunnelquerschnitte. Er befindet sich in der Regel innerhalb der Wechsellagerung, wobei die Zone des meist stark klüftigen Hauptsandsteins den für die Wasserführung im Lias-Aquifer maßgeblichen Horizont darstellt. Infolge der abdichtenden Wirkung von Ton- bzw. Tonsteinlagen können teilweise auch gespannte Grundwasserverhältnisse vorliegen. Der im Längsschnitt (Bild 3) eingetragene Grundwasserspiegel HW2 tritt mit einer Jährlichkeit von 2 Jahren auf. Der Grundwasserspiegel HW100 wurde für eine Jährlichkeit von 100 Jahren berechnet. Für die Durchführung der Vortriebsarbeiten sind die Grundwasserstände von untergeordneter Bedeutung, da sich bauzeitlich eine Grundwasserabsenkung einstellt. Davon unabhängig sind die Grundwasserzutritte beim Vortrieb im Bereich der Tonsteinzone des Lias α aufgrund der sehr geringen Wasserdurchlässigkeit vernachlässigbar klein. Die laufenden Vortriebsarbeiten bestätigen diese Erfahrung.

### 3.2 Gefügemodell, felsmechanische Eigenschaften und Primärspannungen

Bild 10 zeigt das Gefügemodell zu den im Bereich des Flughafentunnels anstehenden Untergrundschichten. In der im oberen Bereich des gesteinsfesten Lias α anstehenden Wechsellagerung dominiert der Anteil der Kalk-/Sandsteine mit ca. 60–70 % gegenüber den zwi-

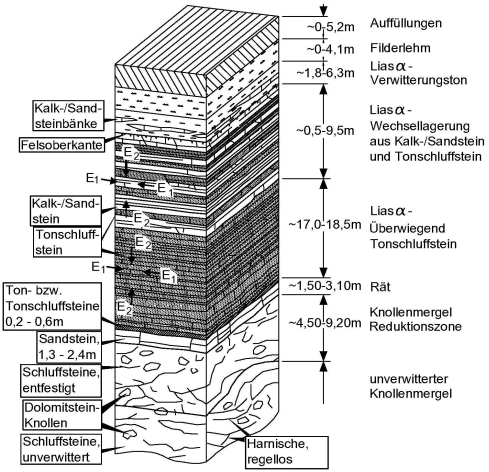


**Bild 10.**
Gefügemodell

schengeschalteten Ton- bzw. Tonschluffsteinen. Die Schichten fallen großräumig flach in östliche Richtungen ein. Aus baupraktischer Sicht kann jedoch für lokale Betrachtungen wie z. B. Standsicherheitsuntersuchungen mit ausreichender Näherung von horizontaler Orientierung der Schichten und der Schichtfugen ausgegangen werden. Die Klüfte, die insbesondere in den Kalk-/Sandsteinbänken deutlich ausgeprägt und teilweise geöffnet sind, stehen steil bis senkrecht und bilden näherungsweise ein orthogonales System. Bild 11 zeigt ein Ortsbrustfoto aus der Zulaufstrecke Ost, in dem die Wechsellagerung aus Kalk-/Sandsteinen (unten) und Tonschluffsteinen (oben) erkennbar ist.

Der untere Bereich des gesteinsfesten Lias α besteht mit einem Anteil von mehr als 90 % ganz überwiegend aus Ton- bzw. Tonschluffsteinen, die auch das mechanische Verhalten bestimmen. In diesem Bereich sind Schichtfugen und Klüfte angelegt, die jedoch meist nur undeutlich erkennbar sind. Die eingelagerten Kalk-/Sandsteine treten nur

**Bild 11.** Ortsbrustfoto im Lias α

lokal in Form dünner Bänke auf und konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Leithorizonte Psilonotenbank und Oolithenbank.

Die Tonsteinschichten des Lias α besitzen eine sogenannte transversalisotrope Verformbarkeit. Die Tonsteine besitzen im Unterschied zu den Kalk-/Sandsteinen fast keine chemische Bindung, sondern wurden im Laufe ihrer Entstehungsgeschichte allein durch hohen Überlagerungsdruck vom Ausgangsmaterial Ton zu Tonstein verfestigt. Infolge der dadurch hervorgerufenen Orientierung des Gefüges im Gestein ist die Verformbarkeit der Schichten in horizontaler Richtung deutlich kleiner als in vertikaler Richtung. Diese Anisotropie wird durch die unterschiedlich großen Elastizitäts- bzw. Verformungsmoduln $E_1$ (horizontal) und $E_2$ (vertikal) (siehe Bild 10) erfasst, wobei der Anisotropiefaktor $E_1/E_2$ größenordnungsmäßig etwa mit 2 angenommen werden kann.

Die Entstehungsgeschichte der Tonsteine im schwarzen Jura durch Vorbelastung hat darüber hinaus ganz wesentlichen Einfluss auf den

in diesen Schichten herrschenden Spannungszustand mit erhöhten horizontalen Primärspannungen (vgl. [3] und [7]). Die Schichten des Schwarzen Juras wurden im Raum Stuttgart vor ca. 195 Millionen Jahren abgelagert und danach mit den Schichten des Braunen und des Weißen Juras überlagert (Bild 12). Durch das Gewicht dieser Überlagerung wurden die als Tone sedimentierten Schichten diagenetisch zu Tonstein verfestigt. Mit dem Anwachsen des Überlagerungsdrucks während der Sedimentation bauten sich infolge der Behinderung der Querdehnung hohe Horizontalspannungen auf. Bei der Verfestigung des Tons zum Tonstein reduziert sich die Querdehnungszahl, die dann in verringerter Größe bei der nachfolgenden Entlastung maßgeblich ist. Aus diesem Grund sind die im Ton entstandenen Horizontalspannungen bei dem in der Kreidezeit und im Tertiär erfolgten Abbau der Überlagerung nicht wieder voll zurückgegangen. Es sind in den Tonsteinen horizontale Primärspannungen verblieben, die größer sind, als es sich nach der üblichen Betrachtungsweise aus dem Gewicht der heutigen Überlagerung und der Berücksichtigung des Seitendruckbeiwerts des Tonsteins ergibt.

Die Erfahrungen aus ausgeführten Projekten in den Lias α-Tonsteinen im Stuttgarter Raum zeigen, dass die zusätzlichen Horizontalspannungen Werte bis zu ca. 2 MN/m$^2$ aufweisen können. Infolge von im

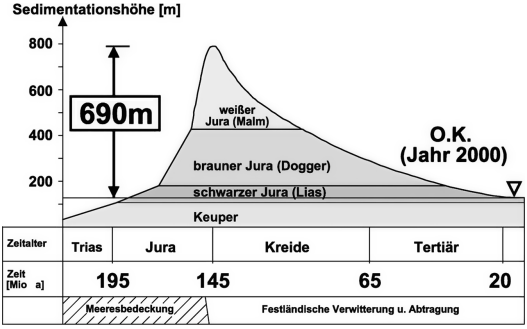


**Bild 12.** Überlagerung im Raum Stuttgart

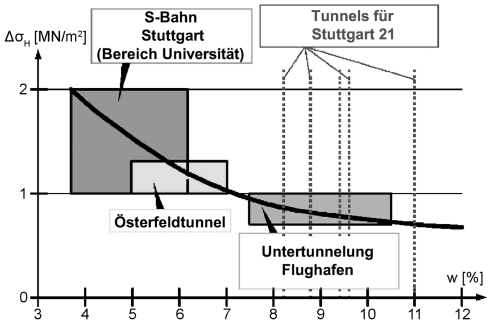


**Bild 13.** Einfluss des Wassergehalts auf die Horizontalspannungen

Lauf der Zeit eingetretenen Entspannungs- und Entfestigungsvorgängen kann es erfahrungsgemäß zu einem teilweisen Abbau der zusätzlichen Horizontalspannungen kommen. Dabei besteht grundsätzlich ein Zusammenhang zwischen den horizontalen Zusatzspannungen und dem Wassergehalt der Tonsteine des Schwarzen Juras, wie vergleichende Betrachtungen gezeigt haben [3]. In Bild 13 sind dazu die Streubereiche der bei verschiedenen Projekten gemessenen Wassergehalte (w) und der horizontalen Zusatzspannungen ($\Delta\sigma_H$) dargestellt. Es deutet sich an, dass die horizontalen Zusatzspannungen mit zunehmendem Wassergehalt abnehmen. Da auch die Verformungsmoduln und die Gesteinsfestigkeiten der Tonsteine mit zunehmendem Wassergehalt, der vermutlich durch Verwitterung bedingt ist, abnehmen, ist dieser Zusammenhang erklärbar.

Die tatsächlichen Primärspannungsverhältnisse sind folglich in Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen differenzierter zu betrachten und projektbezogen in Form einer zu berücksichtigenden Bandbreite festzulegen. Im Fall des Flughafentunnels und der Station NBS hat sich ergeben, dass als charakteristischer Wert für die zusätzlichen horizontalen Primärspannungen 0,5 MN/m$^2$ angenommen werden kann. Die gesamte Bandbreite der Zusatzspannungen sollte hier mit 0 – 1 MN/m$^2$ berücksichtigt werden [2].

Zur ergänzenden Erläuterung der vorstehenden Ausführungen bezüglich der horizontalen Zusatzspannungen in den Tonsteinen des Lias α wird im Folgenden exemplarisch auf Erfahrungen bei in der Vergangenheit unter Beteiligung von WBI ausgeführten Projekten im Stuttgarter Raum eingegangen.

## 4 Erfahrungen bei ausgeführten Projekten

### 4.1 S-Bahn Haltestelle Universität Stuttgart

Die in Vaihingen gelegene Haltestelle Universität der S-Bahn Stuttgart wurde in offener Bauweise in einer ca. 220 m langen und ca. 20 m tiefen Baugrube hergestellt, die überwiegend in die Tonschluffsteine des Lias α einschneidet und im Sohlbereich noch den Knollenmergel erreicht.

Bild 14 [4] zeigt die gemessenen horizontalen Wandverschiebungen in einem Querschnitt, der etwa in Baugrubenmitte liegt. Es zeigt sich, dass beim Aushub im Tonschluffstein Horizontalverschiebungen von bis zu ca. 60 mm gemessen wurden. Die Verschiebungen nahmen mit

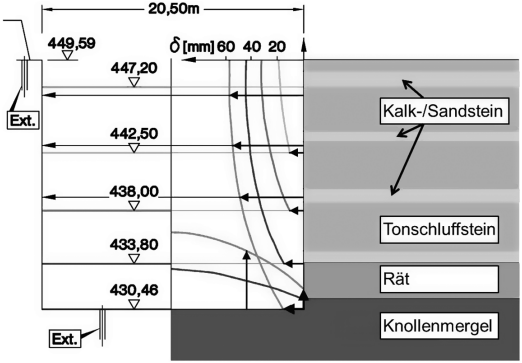


**Bild 14.** Baugrube Haltestelle Universität, gemessene Verschiebungen im Schnitt

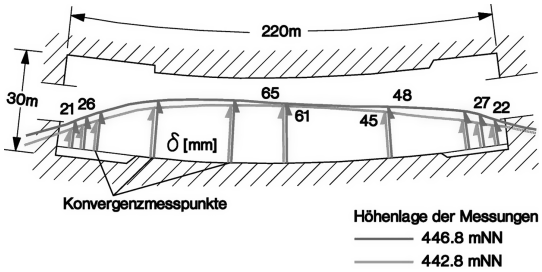


**Bild 15.** Baugrube Haltestelle Universität, Horizontalverschiebungen

zunehmender Aushubtiefe deutlich zu. Wie in Bild 15 [4] in einer Grundrissdarstellung zu erkennen ist, waren die gemessenen Verschiebungen im mittleren Bereich der langen Baugrube deutlich größer als an den Baugrubenenden. Ein Vergleich der gemessenen Horizontalverschiebungen der Baugrubenwände mit den Messergebnissen von 30 m langen horizontalen Extensometern zeigte, dass mit den Extensometern nur etwa 40 % der gesamten im Untergrund aufgetretenen horizontalen Verschiebungen gemessen werden konnten. Dies deutet auf eine sehr große Reichweite der Horizontalverschiebungen von mehr als 100 m hin. Aufgrund der mit zunehmendem Abstand von der Baugrube abnehmenden horizontalen Verschiebungen des Untergrundes haben sich seinerzeit Zerrungen eingestellt, die zu Schäden an benachbarten Gebäuden geführt haben.

Eine rechnerische Interpretation der im Bereich der Baugrube an der Universität gemessenen Verschiebungen hat ergeben, dass in den Tonsteinen von zusätzlichen Horizontalspannungen in der Größenordnung von ca. 1 – 2 MN/m$^2$ auszugehen ist. Die horizontalen Primärspannungen müssen bei langen Baugruben in den Bereich unterhalb der Baugrube umgeleitet werden. Dort kommt es dann zu Spannungskonzentrationen. Die Umlagerung der Spannungen in den Bereich unterhalb der Baugrube führt zu einer weiträumigen Entlastung neben der Baugrube, die zu horizontalen Verschiebungen und damit verbundenen Zerrungen führt. Um die Verschiebungen klein

zu halten, muss daher die seitliche Entlastung gering gehalten werden. Dies kann durch eine Begrenzung der Baugrubenlänge und durch einen steifen Verbau erfolgen. Die Erkenntnisse wurden bei der Konzeption und der Planung der Schächte des Zentralen Zugangs der Station NBS berücksichtigt und durch einen entsprechenden Bauablauf umgesetzt.

## 4.2 S-Bahn Haltestelle Flughafen Stuttgart

Auch die S-Bahn Haltestelle Flughafen wurde in offener Bauweise errichtet. Die Baugrube wurde zunächst in den Deckschichten und im Fels der Wechsellagerung des Lias α ausgehoben. Anschließend erfolgte der Aushub in den Tonschluffsteinen, in denen die horizontalen Zusatzspannungen wirksam sind. So wurde beim Aushub des tieferen Abschnittes der Baugrube dann auch eine deutliche Zunahme der horizontalen Wandverschiebungen in Höhe der Felsoberkante gemessen (Bild 16, [3]).

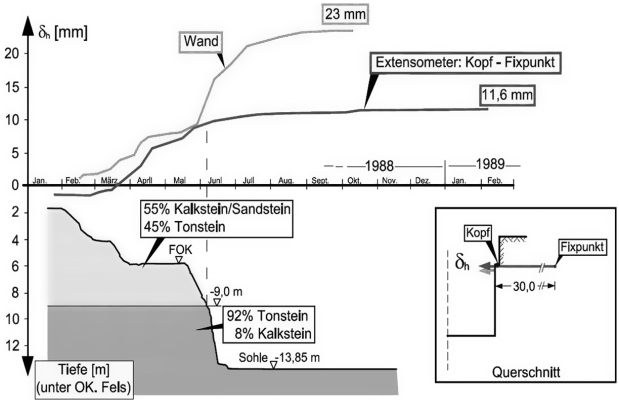


**Bild 16.** Baugrube S-Bahn Station Flughafen Stuttgart, Horizontalverschiebungen

An den Messergebnissen für einen 30 m langen Horizontalextensometer ist erkennbar, dass sich die horizontalen Untergrundverschiebungen neben der Baugrube auf einen größeren Bereich erstrecken. Während die Verschiebungsdifferenzen zwischen dem Extensometerkopf (an der Wand) und dem Extensometerfußpunkt (im Untergrund 30 m neben der Wand) in der Anfangsphase des Aushubs noch näherungsweise der absoluten Wandverschiebung entsprechen, nehmen sie bei fortschreitender Aushubtiefe fast nicht mehr zu (Bild 16). Erklärt werden kann dies damit, dass der gesamte Extensometer aufgrund weitreichender horizontaler Verschiebungen neben der Baugrube quasi im entlasteten Untergrund schwimmt. Ursache sind die erhöhten Horizontalspannungen in den Tonschluffsteinen des Schwarzjuras.

## 4.3 S-Bahntunnel vom Flughafen nach Filderstadt-Bernhausen

Mit dem eingleisigen S-Bahntunnel vom Stuttgarter Flughafen nach Filderstadt-Bernhausen wurden u. a. das Vorfeld und die Start-/Landebahn des Flughafens in bergmännischer Bauweise unterfahren. Der Tunnel mit Kreisquerschnitt verläuft dabei überwiegend innerhalb der Tonschluffsteinschichten des Lias α [5], [6], [7].

Im Rahmen des baubegleitenden Messprogramms wurden Verformungsmessungen an der Geländeoberfläche und untertage durchgeführt. In Bild 17 sind exemplarisch die Ergebnisse von Verschiebungsmessungen an einem Querschnitt im Bereich zwischen Vorfeld und Start-/Landebahn dargestellt. Es zeigt sich, dass die mittels Nivellement erfassten Senkungen an der GOF sehr klein sind und nur wenige Millimeter betragen. Mit den seitlich vom Tunnelquerschnitt installierten Inklinometern konnten dagegen deutliche, auf den Hohlraum hin gerichtete Horizontalverschiebungen im Untergrund (Tonschluffsteine) erfasst werden. Auch bei den Messungen im Tunnelquerschnitt zeigten sich häufig in horizontaler Richtung größere Verschiebungen als in vertikaler Richtung. Bei der Bewertung der untertägigen Messungen im Tunnel ist zu berücksichtigen, dass dabei nicht die gesamten vortriebsbedingten Verschiebungen erfasst werden können,

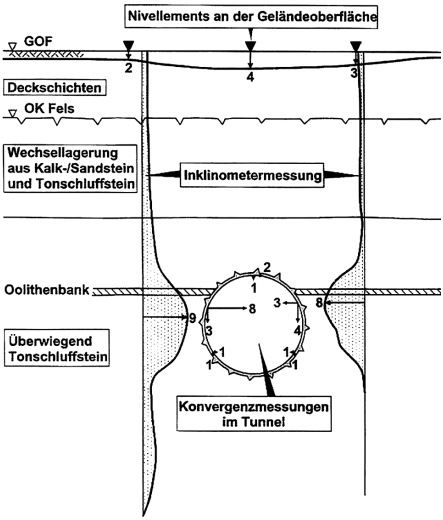


**Bild 17.** S-Bahntunnel nach Bernhausen, gemessene Verschiebungen

da die Messbolzen erst hinter der Ortsbrust gesetzt und nullgemessen werden können.

Davon unabhängig kann festgestellt werden, dass das in Bild 17 dargestellte typische Verschiebungsbild auf erhöhte horizontale Primärspannungen in den Tonschluffsteinen des Lias α zurückzuführen ist. Rechnerische Interpretationen der gemessenen Verschiebungen haben diesbezüglich auf gute Übereinstimmungen bei Ansatz horizontaler Zusatzspannungen zwischen 0,5 und 1,0 MN/m$^2$ geführt.

## 5 Standsicherheitsnachweise

### 5.1 Stations- und Streckenröhren

Bild 18 zeigt in einem Lageplanausschnitt den Bereich der Station NBS und die Tunnelröhren der Zulaufstrecken West und Ost in den

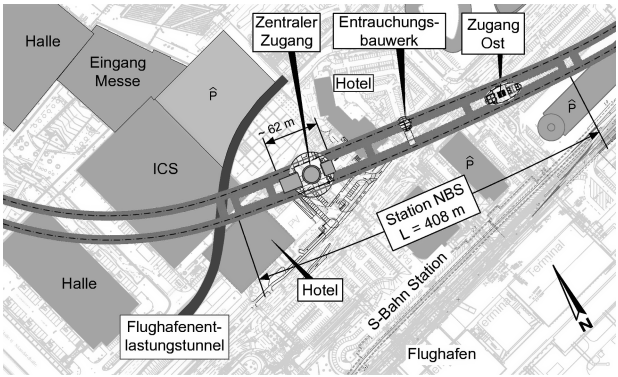


**Bild 18.** Lageplan Bereich Station NBS und Zugänge

Anschlussbereichen. Am Beispiel der Stationsröhren im Bereich zwischen dem Zugang Ost und der östlichen Zulaufstrecke werden im Folgenden die statischen Berechnungen zum Bauzustand des Vortriebs (Ausbruch und Sicherung) erläutert.

Sämtliche Berechnungen werden nach der Finite-Elemente- (FE-)Methode durchgeführt, wobei je nach vorliegenden Verhältnissen und Randbedingungen entweder echt räumliche 3D-Berechnungen oder, zur Verringerung des rechentechnischen Aufwands, pseudoräumliche 2D-Berechnungen durchgeführt werden. Letztere sind dann angemessen und ausreichend, wenn ein Linienbauwerk (Tunnel in Regelbereichen) untersucht wird, bei dem sich die Verhältnisse bezüglich der Geometrie, der Untergrundverhältnisse und der äußeren Lasteinwirkungen mit fortschreitendem Vortrieb nicht sehr stark ändern, keine Aussagen zur Standsicherheit im Ortsbrustbereich erforderlich sind und keine besonderen Anforderungen im Hinblick auf die Entwicklung der Senkungen während der Vortriebsarbeiten bestehen.

Um in den 2D-Berechnungen mit ausreichender Näherung die beim Vortrieb eintretenden vorauseilenden Spannungsumlagerungen und

Verschiebungen im Untergrund berücksichtigen zu können, wird üblicherweise die Methode der Vorentspannung angewendet. Dabei wird vor der rechnerischen Simulation des Ausbruchs und des Einbaus der Sicherung (Spritzbetonschale) das im Ausbruchquerschnitt anstehende Gebirge durch eine Reduktion der Untergrundsteifigkeit (Abminderung des E-Moduls) teilentspannt. Die dabei eintretenden Spannungsänderungen und Verformungen können als dem Vortrieb vorauseilend interpretiert werden. Bei der Simulation des Ausbruchs und des gleichzeitigen Einbaus der Sicherung im Schritt nach der Vorentspannung ergeben sich dann realistische Beanspruchungen der Spritzbetonschale. Die in der Summe infolge der Vorentspannung und des Ausbruchs berechneten Verschiebungen im Untergrund und an der Geländeoberfläche (Senkungen) sind ebenfalls wirklichkeitsnah. Der bei dieser Methode anzusetzende Vorentspannungsfaktor hängt jedoch von der Tunnelgeometrie und der Ausbruchfolge (Kalotte, Strosse/Sohle) sowie von der Sicherung, den Untergrundverhältnissen und den Primärspannungen ab. Daher sollte im Hinblick auf den Erhalt wirklichkeitsnaher 2D-Berechnungsergebnisse der Vorentspannungsfaktor möglichst mithilfe echt räumlicher 3D-Berechnungen kalibriert werden.

Bild 19 zeigt ein für den östlichen Stationsbereich erstelltes 3D-FE-Netz, das auch für die Kalibrierung des Vorentspannungsfaktors verwendet wurde. Im FE-Netz wird der Untergrund entsprechend der vorliegenden Schichtenfolge nachgebildet. Die geotechnischen Kennwerte werden auf der Grundlage des Tunnelbautechnischen Gutachtens [2] angenommen und nach Erfordernis variiert. Mit dem FE-Modell können das transversalisotrope Spannungs-Dehnungs-Verhalten sowie – sogar richtungsorientiert –Trennflächen mit reduzierten Festigkeiten (Schichtfugen, Klüfte, Harnische) einbezogen werden. Die erhöhten horizontalen Primärspannungen in den Tonschluffsteinen werden als Differenzspannungen zu den infolge Eigengewicht und behinderter Querdehnung eintretenden Seitendrücken berücksichtigt. Auflasten aus Gebäuden können als äußere Flächen- oder Linienlasten angesetzt werden, sofern auf eine diskrete Nachbildung von Gebäuden oder Gründungsbauteilen verzichtet wird. Auch dies ist natürlich möglich und wird in Einzelfällen so umgesetzt.

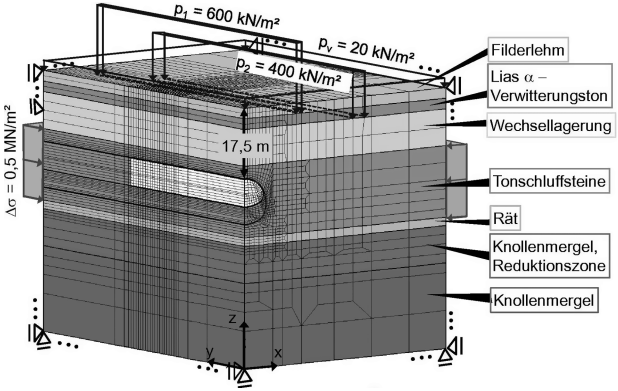


**Bild 19.** 3D-Berechnungen der Stationsröhren, FE-Netz

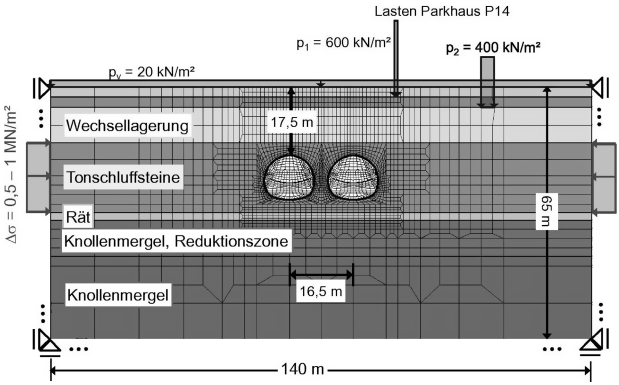


**Bild 20.** Pseudoräumliche 2D-Berechnungen der Stationsröhren, FE-Netz

Die Tunnelgeometrie einschließlich der Spritzbetonsicherung wird im FE-Netz dem geplanten Vortrieb entsprechend mit den jeweiligen Teilquerschnitten nachgebildet. Bei den Stationsröhren erfolgt die Nachbildung für einen Kalottenvortrieb mit temporärem Kalottensohlgewölbe und nachlaufendem Strossen-/Sohlvortrieb. Der scheibenförmige Aufbau des 3D-FE-Netzes wird so gewählt, dass im zentralen Bereich des Berechnungsausschnitts der Vortrieb nach der „Step by Step"-Methode abschlagsweise simuliert werden kann.

In Bild 20 ist das zweidimensionale scheibenförmige FE-Netz zur Durchführung der pseudoräumlichen 2D-Berechnungen dargestellt. Bild 21 enthält eine zugehörige Detaildarstellung für den Bereich des Tunnelquerschnitts mit der Nachbildung der Spritzbetonschalen in den Teil- und Gesamtquerschnitten durch Kontinuumselemente. Die Vorgehensweise zur Durchführung der Berechnungen nach der Vorentspannungsmethode wurde oben erläutert. 2D-Berechnungen haben im Vergleich zu 3D-Berechnungen den Vorteil, dass mit geringerem Aufwand eine größere Anzahl von Berechnungsfällen mit Variation der Kennwerte, der Primärspannungen und weiterer Parameter durchgeführt werden kann. Die kalibrierten Vorentspannungs-

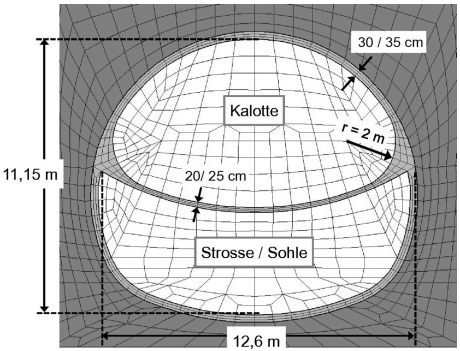


**Bild 21.** FE-Netz, Detail, Kalotten- und Strossen-/Sohlvortrieb

faktoren lassen sich meist auch auf benachbarte Berechnungsquerschnitte übertragen, bei denen grundsätzlich ähnliche Verhältnisse vorliegen, auch wenn die Lage der Tunnelquerschnitte in Relation zu den Schichten, die Überlagerungshöhe und die äußeren Lasten etwas abweichen.

Auf dieser Grundlage werden für die verschiedenen Regelbereiche der Station NBS statische Berechnungen durchgeführt. Echt räumliche Situationen wie z. B. Verschneidungen mit Querschlägen oder Schächten werden nach Erfordernis mittels 3D-Berechnungen untersucht. Die beschriebene Vorgehensweise gilt grundsätzlich auch für die Standsicherheitsuntersuchungen zu den Streckenröhren. Die statischen Berechnungen nach der FE-Methode dienen nicht nur dem Nachweis der Standsicherheit für eine gewählte Vortriebsklasse, sondern erlauben bei entsprechender Simulation und Variation der Parameter auch die Erfassung der Einflüsse unterschiedlicher Schalenstärken, der Ankerung und – bei 3D-Untersuchungen – auch der Abschlaglängen und der vorauseilenden Sicherung auf die Beanspruchungen und auf die vortriebsbedingten Senkungen. 3D-Berechnungen mit Nachbildung der vorauseilenden Sicherung wurden beispielsweise für den Fall der Unterfahrung des Widerlagers der Heerstraßenbrücke mit der Südröhre der Zulaufstrecke West durchgeführt, die – wie auch die bergmännische Unterfahrung der BAB A8 bei geringen Überdeckungshöhen – im Schutz von Rohrschirmen durchgeführt wurde.

## 5.2 Zentraler Zugang

Bei der zentralen Zugangsanlage der Station NBS handelt es sich um einen ca. 62 m langen Baubereich, der besondere Anforderungen an die statisch-konstruktive Planung und die Bauausführung stellt (vgl. [4]). Die Bilder 22 und 23 zeigen im Grundriss und im Längsschnitt die zwischen den beiden unmittelbar angrenzenden Bahnsteigröhren angeordneten Schachtbauwerke. In dem mittleren kreisrunden Schacht werden später die Aufzüge zur Bahnsteigebene angeordnet. Östlich und westlich davon liegen in geringem Abstand dazu die beiden Rechteckschächte für die Technikgebäude Ost und West. Bild 24

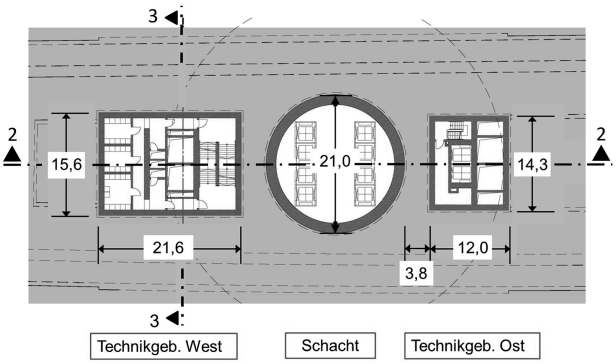


**Bild 22.** Zentraler Zugang Station, Grundriss Schachtbauwerke

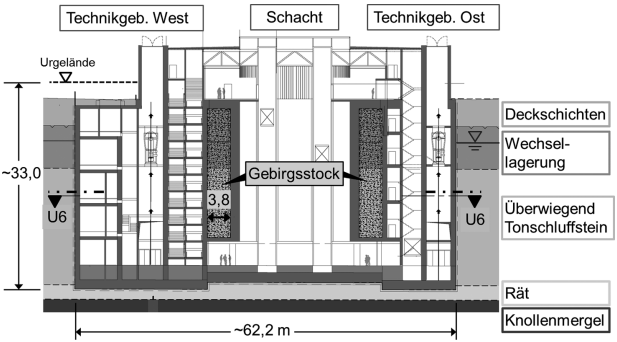


**Bild 23.** Zentraler Zugang Station, Längsschnitt 2-2, Schachtbauwerke

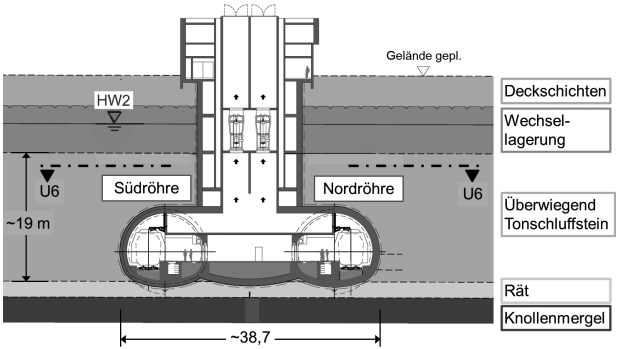


**Bild 24.** Zentraler Zugang Station, Querschnitt 3-3

zeigt einen Querschnitt durch das Technikgebäude West im Bereich des Anschlusses der Entrauchungskanäle über den Bahnsteigen an den aufgehenden Entrauchungsschacht im Technikgebäude.

Zwischen den Technikgebäuden und dem kreisrunden Schacht verbleiben relativ schmale Gebirgsstöcke. Diese Gebirgsstöcke werden nur in Höhe der Stationsröhren unterbrochen, um den Übergang zwischen den beiden Bahnsteigen neben dem runden Aufzugsschacht zu ermöglichen. Wie erläutert erfordern die geometrischen Verhältnisse an der zentralen Zugangsanlage und insbesondere auch die vorliegenden geotechnischen Randbedingungen mit den zusätzlichen Horizontalspannungen in den Tonschluffsteinen des Lias α einen besonderen Bauablauf, um unzulässig große Verschiebungen im Umfeld der Anlage zu vermeiden und die Standsicherheit in jeder Bauphase zu gewährleisten. Es werden daher zunächst die beiden Rechteckschächte für die Technikgebäude abschlagsweise ausgehoben und mit stark bewehrtem Spritzbeton und einer flach geneigten Systemankerung gesichert. Wegen der länglichen Geometrie des westlichen Schachtes werden dort zur Begrenzung der Horizontalverschiebungen aushubbegleitend insgesamt sechs temporäre Quersteifen aus Stahlträgern eingebaut. Diese Steifen werden erst im Zuge der Aus-

kleidung der Schächte mit der Stahlbetoninnenschale und aussteifenden Querwänden zurückgebaut.

Erst nach der Auskleidung der beiden Rechteckschächte wird der zentrale Rundschacht abgeteuft, gesichert und mit der zylindrischen Innenschale ausgebaut. Da diese Zylinderschale nicht bis auf die Bahnsteigebene heruntergeführt werden kann, wird sie unten temporär auf Hilfsstützen abgesetzt. Diese werden in einer späteren Bauphase nach dem Auffahren und der Auskleidung der mit dem Schacht zu verschneidenden Bahnsteigröhren gegen die endgültigen scheibenartigen Stahlbetonstützen ausgetauscht.

Für die Berechnung und die Nachweise der Sicherungen und der Auskleidungen sind aufgrund der komplexen Verhältnisse und des statisch relevanten Bauablaufs aufwendige räumliche FE-Berechnungen notwendig. Im Berechnungsmodell werden sämtliche Teilbauwerke der zentralen Zugangsanlage (Schächte, Bahnsteigröhren, Übergänge) so nachgebildet, dass die Nachweise für alle maßgeblichen Bauzustände und den Endzustand geführt werden können. In Bild 25 ist das verwendete 3D-FE-Modell dargestellt. Die Bilder 26 und 27 zeigen exemplarisch Details des verwendeten FE-Netzes. Darin sind die

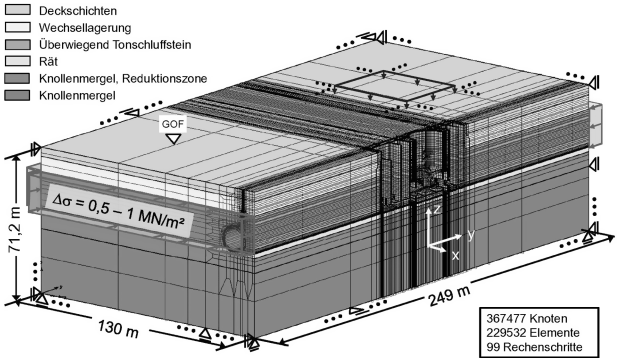


**Bild 25.** Zentraler Zugang Station, 3D-FE-Netz

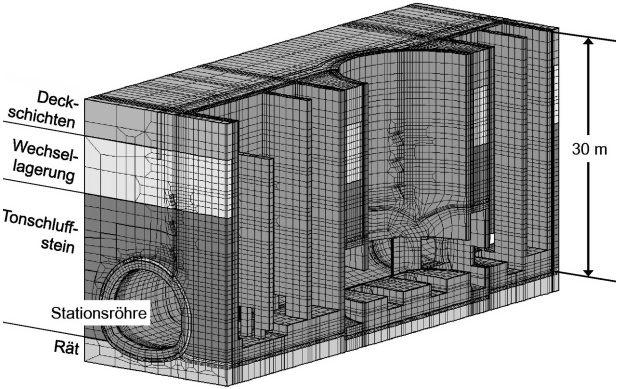


**Bild 26.** Zentraler Zugang Station, 3D-FE-Netz, Detail 1

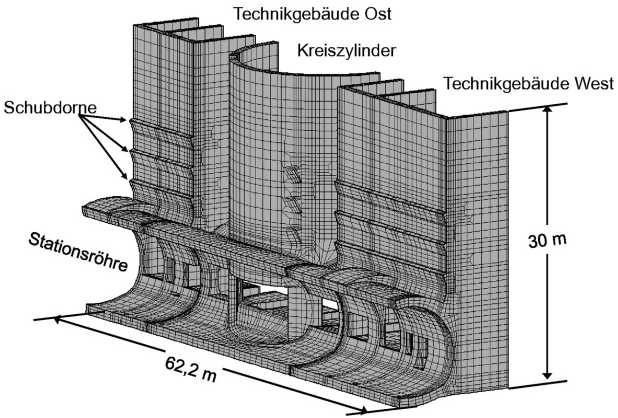


**Bild 27.** Zentraler Zugang Station, 3D-FE-Netz, Detail 2

nachgebildeten Strukturen der Technikgebäude West und Ost, des Rundschachtes und einer angrenzenden Stationsröhre erkennbar.

Nur beispielhaft sind in Bild 28 Berechnungsergebnisse für einen Fall dargestellt, in dem die Obergrenze der in den Tonschluffsteinen anzunehmenden horizontalen Zusatzspannungen (1,0 MN/m$^2$) berücksichtigt wurde. Die Abbildung zeigt in einem Horizontalschnitt aus dem Bereich dieser Schicht die umgelagerten Spannungen im Untergrund nach dem Aushub und der Sicherung der drei Schächte des zentralen Zugangs. Bereits nach dem Abteufen der Schächte für die Technikgebäude ergibt sich eine Spannungsumlagerung um die rechteckigen Baugruben herum und eine Spannungskonzentration östlich und westlich der Baugrubenstirnseiten. Das Abteufen des zwischen den Rechteckschächten liegenden kreisrunden Schachtes führt dann zu einer weiteren Zunahme der horizontalen Spannungen mit einer starken Konzentration in den zwischen den Schächten verbleibenden Gebirgsstöcken (Bild 28). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, diese

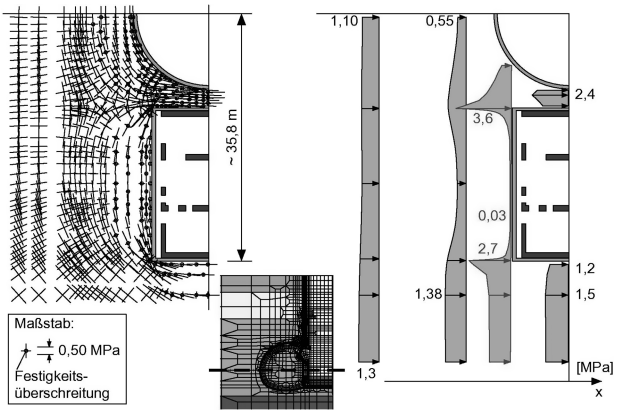


**Bild 28.** Zentraler Zugang Station, Spannungen nach Aushub und Sicherung der Schachtbaugruben

Bereiche beim Abteufen des Rundschachtes durchzuankern (Kürzen und Kontern der Anker aus den Rechteckschächten) und eine ausreichend dimensionierte Spritzbetonschale einzubauen.

## 6 Stand der Bauarbeiten

Nach Aufnahme der Bauausführung Anfang des Jahres 2020 wurde im Hinblick auf die möglichst schnelle Bereitstellung der Angriffspunkte für die bergmännischen Vortriebe die Baugrube für die offene Tunnelbauweise West auf der Nordseite der BAB A8 ausgehoben und gesichert. Über eine seitliche Rampe kann von dort aus der Vortrieb der beiden bergmännischen Tunnelröhren der Zulaufstrecke West angedient werden, ohne die gleichzeitige Herstellung der offenen Tunnelblöcke zu behindern. Mit den Vortrieben von Westen wurden die Autobahn, die Heerstraßenbrücke und das Freigelände der Messe bereits erfolgreich mit den vollen Tunnelquerschnitten unterfahren. Mit Beginn der Unterfahrung der Messehalle 3 wurden beide Röhren auf vorauseilende Kalottenvortriebe mit temporärem Sohlgewölbe umgestellt. Diese Vortriebe haben die Halle 3 bereits vollständig unterfahren und befinden sich Stand Mai 2021 im Bereich der Unterfahrung der Halle 4.

Im Osten wurde zunächst die BAB A8 temporär nach Norden verschwenkt, sodass im ursprünglichen Autobahnbereich in einer ersten Bauphase die Baugrube Ost für die offene Tunnelbauweise und darin die Tunnelblöcke hergestellt werden konnten (Bild 29). Die im Mai 2021 weitgehend fertiggestellten Blöcke der Bauphase 1 werden eingeschüttet, sodass die Autobahn in ihre Ursprungslage zurückverlegt und der offene Tunnelabschnitt der Bauphase 2 begonnen werden kann. Aus der Baugrube Ost in offener Bauweise wurden die bergmännischen Tunnelröhren der Zulaufstrecke Ost in Richtung der Station NBS lediglich auf kurzer Länge ausgebrochen und gesichert (Gegenvortrieb). Der eigentliche Vortrieb dieser Tunnelröhren erfolgt von der Station aus.

Als Angriffspunkt für die Vortriebe im Stationsbereich und an der Zulaufstrecke Ost dient der große temporäre Schacht im Bereich des späteren Stationszugangs Ost (Bild 30). Mit dem Aushub und der

**Bild 29.** Baugrube Zulauf Ost

**Bild 30.** Baugrube Zugang Ost

Sicherung dieser runden Baugrube mit einem Durchmesser von ca. 45 m wurde ebenfalls frühzeitig begonnen. Der Schacht wurde zunächst bis auf das Niveau unterhalb der Kalottensohle der Stationsröhren abgeteuft und gesichert. Von den vier Vortrieben aus dem Schacht läuft seit Mai 2021 der Kalottenvortrieb der Südröhre nach Westen. Für den Vortrieb der Südröhre nach Osten wurde der Anfahrbereich am Schacht hergestellt. Die beiden weiteren Vortriebe sollen zeitnah begonnen werden. Für die späteren Strossen-/Sohlvortriebe der Stationsröhren wird die Schachtbaugrube am Zugang Ost dann noch weiter vertieft.

Im Bereich der zentralen Zugangsanlage wurde zunächst eine großflächige Baugrube hergestellt, deren Sohle etwa auf Höhe der Felsoberkante liegt (Bild 31). Von dort aus wurden zeitlich parallel die beiden Rechteckschächte abschnittsweise ausgehoben und gesichert. Aufgrund der größeren Grundfläche und der erforderlichen Queraussteifung eilte der Schacht für das Technikgebäude West dem östlichen Schacht etwas nach (Bild 32). Im Mai 2021 waren beide Schächte vollständig ausgehoben und gesichert und der Einbau der Kunststoffdichtungsbahn (KDB) war bereits weit vorangeschritten (Bild 33).

**Bild 31.** Baugrube zentraler Zugang, oberer Teil

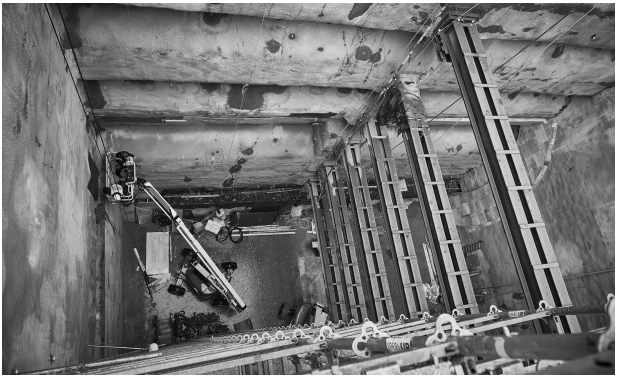

**Bild 32.** Zentraler Zugang, Technikgebäude West, Blick in den Schacht

**Bild 33.** Zentraler Zugang, Technikgebäude West, Abdichtungsarbeiten

Danach liefen die Arbeiten zur Herstellung der Stahlbetonauskleidungen der beiden Technikgebäude an. Aus statischen Gründen kann erst nach der Herstellung dieser Auskleidungen mit dem Aushub des dazwischenliegenden zentralen Rundschachtes begonnen werden.

Zwischen dem Zugang Ost und dem zentralen Zugang wird das Entrauchungsbauwerk Mitte hergestellt. Der auf der nördlichen Stationsröhre positionierte Schacht wird derzeit abschnittsweise ausgebrochen und gesichert und steht kurz vor seiner Endteufe. Im Anschluss wird vom Schacht aus der Querstollen zur Südröhre aufgefahren. Mit den Vortrieben der Stationsröhren vom Schacht am Zugang Ost wird dann der bereits vollständig gesicherte Bereich des Entrauchungsbauwerks Mitte durchfahren und der Vortrieb bis zum westlichen Ende der zentralen Zugangsanlage fortgesetzt. Dort ist der Durchschlagpunkt zu den von Westen aus kommenden Vortrieben vorgesehen.

## 7 Monitoring und Vergleich mit Prognosen

Die Baumaßnahme wird kontinuierlich durch ein umfangreiches Monitoring begleitet. Der Schwerpunkt des Monitorings liegt dabei auf der Erfassung der baubedingt eintretenden Verschiebungen und umfasst Verschiebungsmessungen am Verbau und an Böschungen der Baugruben und Schächte, untertägige Verschiebungsmessungen in den bergmännischen Vortrieben, Senkungsmessungen an der Geländeoberfläche im Einflussbereich der Baugruben, Schächte und Vortriebe sowie Messungen an den im Beweissicherungsbereich liegenden Gebäuden, Anlagen und Verkehrswegen. Hierfür werden räumliche Messungen an 3D-Messpunkten und Nivellements durchgeführt. Zudem werden im Untergrund auftretende Verschiebungen mithilfe von Extensometern und Inklinometern bzw. Kettenneigungsmessstellen erfasst. Im Bereich der Schächte der zentralen Zugangsanlage werden auch Spannungsmessungen im Spritzbeton durchgeführt. Darüber hinaus werden Ankerkräfte an Verpressankern von Baugrubenverbauten und Steifenkräfte in der Schachtbaugrube des Technikgebäudes West gemessen.

In das baubegleitende Monitoring werden Messeinrichtungen integriert, die bereits längere Zeit vor Beginn der laufenden Baumaß-

nahmen installiert und genutzt wurden. Hierbei handelt es sich um Messpunkte aus der geodätischen Beweissicherung an Gebäuden und um Messpunkte des sogenannten Langzeitmonitorings. Auch die damals erhobenen Daten werden in das jetzt stattfindende Monitoring einbezogen.

Besonders erwähnenswert ist dabei das Messprogramm an den Gebäuden und Anlagen der Messe Stuttgart. Hier wurden im Bereich der Messehallen 3 und 4, des Kongresszentrums ICS, des Flughafenentlastungstunnels sowie im Bereich des Freigeländes bereits vor der Vergabe der Baumaßnahmen zahlreiche Messeinrichtungen installiert und in Betrieb genommen. Es handelt sich um Stangenextensometer, um Kettennneigungsmessstellen, um Schlauchwaagesysteme und um ergänzende Nivellementmesspunkte. Die Messeinrichtungen wurden überwiegend aus den Gebäuden heraus installiert und sind, soweit möglich, mit einer automatischen Messwerterfassung ausgestattet. Das primäre Ziel dieses Messprogramms besteht darin, die aus der Unterfahrung mit den Tunnelröhren und Querschlägen (Verbindungsbauwerke und Schwallbauwerke) der Zulaufstrecke West sowie bereichsweise auch mit den Stationsröhren resultierenden Verschiebungen dieser Bauwerke, insbesondere im Bereich der Gründungen, zu erfassen.

Mit den Messstellen der automatisierten Schlauchwaagesysteme und den ergänzenden Nivellements an den zugehörigen Referenzmessstellen können vertikale Höhenänderungen in den maßgeblichen Bauwerksbereichen und an den Köpfen der Extensometer festgestellt werden. Diese sind teilweise als Kurzextensometer mit einer Stange ausgeführt, deren Verankerungspunkt sich im Untergrund in geringer Tiefe unterhalb der Gründungssohle des überwachten Stahlbetonbauteils befindet. Damit ist es möglich, eventuelle Senkungsdifferenzen zwischen dem Bauteil und dem Untergrund im direkten Gründungsbereich und potenzielle Hohllagen infolge der Überbrückung durch steife Bauteile zu erfassen. Die tiefer reichenden Mehrfach-Stangenextensometer dienen ebenso wie die Kettenneigungsmessstellen (Inklinometermessstellen mit kontinuierlicher automatischer Messwerterfassung) der Erfassung der relevanten vortriebsbedingten Untergrundverschiebungen (vertikal und horizontal) im Umfeld des

Hohlraumbaus. Sie sind in Verbindung mit den untertägigen Messungen im Tunnel und den obertägigen Messungen eine wesentliche Grundlage für die Interpretation der Verformungen im Hinblick auf die in den rechnerischen Prognosen getroffenen Annahmen (Kennwerte, Primärspannungen) sowie ein wesentliches Instrument zur Steuerung der Vortriebe (Festlegung der Vortriebsklassen und Vortriebsgeschwindigkeiten sowie eventueller Sondermaßnahmen).

Für die Unterfahrung der BAB A8 mit den bergmännischen Vortrieben der beiden Zulaufröhren West bei laufendem Autoverkehr und ohne jegliche Sperrung von Fahrspuren wurden die Fahrbahnen und angrenzenden Punkte kontinuierlich mittels eines automatisierten Monitoringsystems überwacht. Die im Fahrbahnbereich reflektorlosen und ansonsten mit Messprismen ausgestatteten Messpunkte wurden durch auf Messpfeilern befestigte motorisierte Präzisionstachymeter in geringen Zeitabständen gemessen. In dieses Monitoring wurden auch die Messpunkte am Widerlager und an Pfeilern der Heerstraßenbrücke sowie Messpunkte im Bereich der hier ebenfalls verlaufenden BAB-Abfahrt aufgenommen.

Vergleichbare automatisierte Monitoringsysteme wurden im Bereich der Unterfahrung der Messehallen 3 und 4 eingesetzt. Auch hier wurden kontinuierlich Messpunkte mittels motorisierter Präzisionstachymeter vermessen. Die mit Prismen versehenen Messpunkte wurden dazu im jeweiligen Unterfahrungsbereich rasterförmig auf dem Betonboden der Hallen aufgeklebt. Das war möglich, da bedingt durch die Corona-Pandemie keine Ausstellungen stattgefunden haben. Darüber hinaus wurden an den aufgehenden Stahlrohrstützen der Hängedächer in geringer Höhe über dem Hallenboden Messprismen befestigt. Aus den Messungen an den Stützen lassen sich über die Differenzen der Vertikalverschiebungen unmittelbar Feststellungen zu eventuellen Schiefstellungen bestimmen.

Die Ergebnisse aller Messungen werden von WBI im Rahmen der Fachbauüberwachung dem Baufortschritt entsprechend ausgewertet, grafisch dargestellt und in Tagesberichten [8] dem abgestimmten Kreis der Beteiligten zur Verfügung gestellt. Für die Auswertungen werden die von der Arge auf einem File-Transfer-Protocol-(FTP-)

Server bereitgestellten Rohdaten der Messungen abgerufen und mithilfe des von WBI entwickelten BIM-Systems (WBIM) aufbereitet. Auf diese Weise ist es möglich, die sehr umfangreichen Messdaten mit vertretbarem Aufwand kontinuierlich zu verarbeiten, zu veranschaulichen und zielgerichtet für die Steuerung der Bautätigkeiten einzusetzen. Darüber hinaus wurden davon unabhängige Meldeketten eingerichtet, über die abgestimmte Warn- und Alarmwerte kommuniziert und erforderliche Maßnahmen veranlasst werden können.

Ergänzend zu den Dokumentationen in den Tagesberichten werden die Ergebnisse der Messungen und Beobachtungen regelmäßig bewertet und im Hinblick auf die Prognosen interpretiert. Mit Stand Mai 2021 kann festgestellt werden, dass sich die im Tunnelbautechnischen Gutachten angegebenen charakteristischen Untergrundkennwerte und die als charakteristisch angenommenen zusätzlichen horizontalen Primärspannungen in den Tonschluffsteinen des Lias α als zutreffend erwiesen haben. Nach der erfolgreichen bergmännischen Unterfahrung der Autobahn und der Heerstraßenbrücke im Westen zeigen auch die laufenden Unterfahrungen der Messehallen vortriebsbedingte Senkungen und Neigungen in den Senkungsmulden, die sehr gut mit den prognostizierten Werten übereinstimmen bzw. tendenziell sogar günstiger sind. Auch die Herstellung der großen Schächte des zentralen Zugangs, von denen die beiden Rechteckschächte für die Technikgebäude bereits vollständig ausgehoben und gesichert wurden, entwickelt sich den Prognosen entsprechend.

Beispielhaft werden im Folgenden die Ergebnisse von Messungen und deren Interpretation im Bereich des Rechteckschachtes für das Technikgebäude (TG) West erläutert. Bild 34 zeigt im Grundriss die Lage der drei Schächte des zentralen Zugangs, von denen die beiden Rechteckschächte TG West und TG Ost bereits abgeteuft wurden. Die Ausführung des zentralen Rundschachts und der angrenzenden Tunnelröhren der Station erfolgt erst in späteren Bauphasen. Außer den Messpunkten in den Schächten wurde hier vor Aushubbeginn auch außerhalb der Schächte eine Reihe von Messeinrichtungen installiert (siehe Bild 34). Es handelt sich teils um kombinierte Messstellen KI (Inklinometer/Extensometer) und teils um reine Extensometermessstellen (EX).

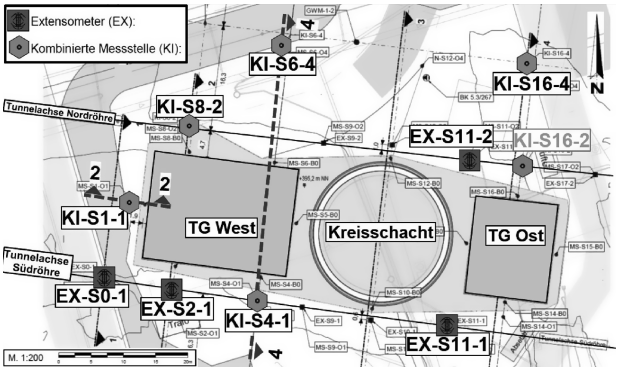


**Bild 34.** Zentraler Zugang Station, Lage der Extensometer und Inklinometer (kombinierte Messstelle)

Die Bilder 35 und 36 zeigen für zwei Schnitte längs und quer zum Rechteckschacht TG West die bis zum vollständigen Aushub und Einbau der Sicherung eingetretenen horizontalen Untergrundverschiebungen, die mit den neben dem Schacht gelegenen Inklinometern gemessen wurden. Deutlich erkennbar sind die zum Schacht hin gerichteten Verschiebungen und deren Abhängigkeit von der Entfernung sowie von den Untergrundschichten. Während die Verschiebungen in den Schichten der Wechsellagerung des Lias α auch im Nahbereich zur Schachtwand mit weniger als 5 mm noch relativ klein sind, nehmen sie in den Tonschluffsteinschichten auf Werte von ca. 10 mm zu. Dies ist im Wesentlichen auf die zusätzlichen horizontalen Primärspannungen in diesen Schichten zurückzuführen.

Im Rahmen der rechnerischen Untersuchungen am 3D-Modell wurden sowohl die Gebirgskennwerte als auch die horizontalen Primärspannungen variiert. Beste Übereinstimmungen mit den Messergebnissen ergaben sich dabei im Berechnungsfall mit Ansatz der charakteristischen Kennwerte und der ebenfalls als charakteristisch angenommenen horizontalen Zusatzspannung von 0,5 $MN/m^2$ im

Lias α-Tonschluffstein. Die rechnerisch ermittelten Horizontalverschiebungen sind für diesen Fall in die Bilder 35 und 36 eingetragen. Berücksichtigt man die erfahrungsgemäß bei Inklinometermessungen auftretenden Unstetigkeiten, so lässt sich bezüglich des Gesamt-

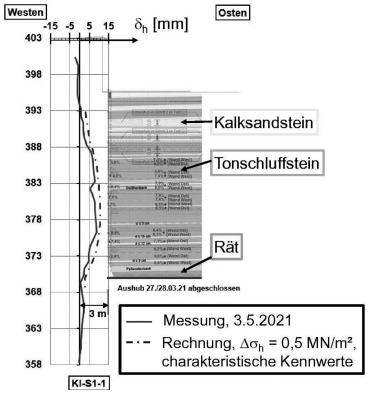


**Bild 35.** Zentraler Zugang Station, Schnitt 2-2, Vergleich Rechnung – Messung

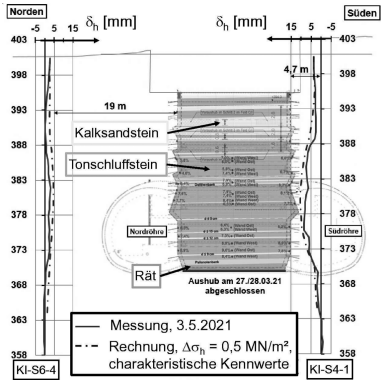


**Bild 36.** Zentraler Zugang Station, Schnitt 4-4, Vergleich Rechnung – Messung

verlaufs eine gute Übereinstimmung zwischen den Rechen- und den Messwerten attestieren. Ohne hier im Einzelnen auf die entsprechenden Vergleiche zwischen den im Vorfeld prognostizierten Verschiebungen und den vorliegenden Messergebnissen im Bereich der Tunnelvortriebe einzugehen, ist festzustellen, dass sich die gutachterlichen Annahmen zu den Gebirgskennwerten und zu den Primärspannungen auch bei den bisher aufgefahrenen Abschnitten der Zulaufstrecke West bestätigt haben.

## 8 Zusammenfassung

Zur Anbindung des Flughafens Stuttgart an die Neubaustrecke Stuttgart – Ulm wird im Planfeststellungsabschnitt 1.3a des Bahnprojekts Stuttgart 21 der Flughafentunnel mit der Station NBS ausgeführt. Sowohl die beiden mehr als 400 m langen Stationsröhren im mittleren Teil des ca. 2,2 km langen Flughafentunnels als auch große Abschnitte der jeweils eingleisigen Tunnelröhren der Zulaufstrecken West und Ost werden in der Spritzbetonbauweise bergmännisch aufgefahren. Mit den bergmännischen Vortrieben werden u. a. die Autobahn A8, zwei Hallen der Messe Stuttgart, das Kongresszentrum ICS, der Flughafenentlastungstunnel sowie zwei Hotels und drei Parkhäuser unterfahren.

Die beiden Zugänge zur Station NBS werden über Schachtbauwerke realisiert. Im Bereich des Zentralen Zugangs werden außerdem in sehr geringem Abstand zum zentralen runden Zugangsschacht zwei große Technikgebäude als Schachtbauwerke hergestellt. Es ergibt sich in diesem Bereich ein mehr als 62 m langes, überaus komplexes räumliches Bauwerk, das durch Verschneidungen vertikal und horizontal orientierter Hohlräume gekennzeichnet ist.

Die bergmännischen Vortriebe verlaufen in den gesteinsfesten Schichten (Fels) des unteren Schwarzen Juras (Lias α). Im oberen Abschnitt dominieren Kalk-/Sandsteine in Form einer Wechsellagerung, der unterer Abschnitt besteht jedoch fast ausschließlich aus Tonsteinen. Diese Tonsteine sind durch diagenetische Verfestigung der sedimentierten Tone unter hohem Überlagerungsdruck entstanden, wobei sich infolge der behinderten Querdehnung große Horizontal-

spannungen eingeprägt haben. Beim späteren Abbau der Überlagerung wurden diese Horizontalspannungen nicht vollständig abgebaut. Es sind horizontale Primärspannungen verblieben, die größer sind als die, die aus der heutigen Überlagerung und unter Berücksichtigung des Seitendruckbeiwerts der Tonsteine erwartbar wären.

Zu diesem Sachverhalt liegen umfassende Erfahrungen von in den Lias α-Tonsteinen im Stuttgarter Raum ausgeführten Projekten vor. Demnach können die zusätzlichen Horizontalspannungen Werte bis zu ca. 2 $MN/m^2$ aufweisen; im Bereich des Flughafentunnels und der Station NBS können als charakteristischer Wert ca. 0,5 $MN/m^2$ angenommen werden. Die gesamte Bandbreite der Zusatzspannungen sollte mit 0 – 1,0 $MN/m^2$ berücksichtigt werden.

Die Standsicherheitsnachweise für die Tunnelvortriebe und die Schachtbauwerke werden unter Berücksichtigung der Besonderheiten des Primärspannungszustands in den Tonsteinen nach der FE-Methode sowohl als echt räumliche 3D- als auch als pseudoräumliche 2D-Berechnungen durchgeführt. Besondere Herausforderungen ergeben sich dabei im Bereich der Zentralen Zugangsanlage: Die geometrischen Verhältnisse und die zusätzlichen Horizontalspannungen in den Tonsteinen erfordern einen besonderen Bauablauf, um unzulässig große Verschiebungen im Umfeld der Zugangsanlage zu vermeiden und um die Standsicherheit in jeder Bauphase zu gewährleisten.

Mit Stand Mai 2021 wurden bereits große Abschnitte der bergmännischen Tunnelröhren der westlichen Zulaufstrecke zur Station erfolgreich aufgefahren. Dabei wurden die BAB A8 und die Heerstraßenbrücke bei laufendem Verkehr unterquert und im Anschluss das Ausstellungfreigelände sowie die Messehallen 3 und 4 weitgehend unterfahren. Die angetroffenen geotechnischen Verhältnisse und die gemessenen vortriebsbedingten Verformungen bestätigen in vollem Umfang die Prognosen und die Ansätze zu den charakteristischen Kennwerten und Primärspannungszuständen. Auch die Arbeiten im Bereich der Station laufen planmäßig und ohne Überraschungen.

Die Baumaßnahme wird durch ein umfangreiches Monitoring mit Messungen über- und untertage sowie an benachbarten Gebäuden,

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

Karl Josef Witt (Hrsg.)

# Grundbau-Taschenbuch

## Set: Teil 1–3

- **einmaliges Nachschlagewerk jetzt aktualisiert**
- **umfassend und auf höchstem Niveau**
- **Berücksichtigung neuester Normen**

Das Grundbau-Taschenbuch ist seit über 60 Jahren das Standardwerk der Geotechnik. Das Werk umfasst drei Bände und behandelt geotechnische Grundlagen, geotechnische Verfahren und Gründungen.

8. vollst. überarb. u. aktualis. Auflage · 2018 · 3326 Seiten · 3 Bände

Hardcover
**ISBN 978-3-433-03154-4**
**€ 483***

eBundle (Print + PDF)
**ISBN 978-3-433-03214-5**
**€ 659***

**BESTELLEN**
+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
**www.ernst-und-sohn.de/3154**

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

Anlagen und Verkehrswegen begleitet. Die Messergebnisse werden kontinuierlich erfasst, dem Baufortschritt entsprechend aufbereitet und im Hinblick auf die Verifizierung der Planungsgrundlagen und der Prognosen interpretiert und bewertet. Ein wesentliches Instrument ist dabei die Aufbereitung und Veranschaulichung der sehr umfangreichen Bau- und Messdaten mithilfe des von WBI entwickelten BIM-Systems (WBIM). Die Ergebnisse werden regelmäßig in Form der von WBI im Rahmen der Fachbauüberwachung erstellten Tagesberichte den an der Baumaßnahme Beteiligten zur Verfügung gestellt. Die positive Resonanz der Empfänger bestätigt die gewählte Vorgehensweise zur Dokumentation und Überwachung der Baumaßnahme.

## Literatur

[1] https://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de

[2] WBI (2017) *Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.3a, Flughafentunnel und Station NBS*, Tunnelbautechnisches Gutachten (unveröffentlicht).

[3] WBI (2015) *Felsmechanische Fragestellungen beim Bahnprojekt Stuttgart-Ulm*. Vorträge anlässlich des Felsmechanik-Tages 2015 im WBI-Center am 16.04.2015, WBI-Print 18, Weinheim.

[4] WBI (2016) *Felsmechanische Fragestellungen beim Bahnprojekt Stuttgart-Ulm*. Vorträge anlässlich des 2. Felsmechanik-Tages 2016 im WBI-Center am 13.04.2016, WBI-Print 19, Weinheim.

[5] Wittke, W. (2014) *Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*, Ernst & Sohn, Berlin.

[6] Tegelkamp, M.; Wittke-Gattermann, P.; Züchner, F. (2000) *S-Bahn Stuttgart – Tunnelvortrieb im wasserführenden Gebirge unter dem Stuttgarter Flughafen ohne Grundwasserabsenkung*, Taschenbuch für den Tunnelbau 2001, Verlag Glückauf GmbH, Essen.

[7] Erichsen, C.; Tegelkamp, M. (1998) *S-Bahn Stuttgart – Streckenverlängerung vom Flughafen nach Filderstadt-Bernhausen – Die Untertunnelung des Flughafens*, Taschenbuch für den Tunnelbau 1999, Verlag Glückauf GmbH, Essen.

[8] WBI (2020/2021) *Tagesberichte der Fachbauüberwachung am Flughafentunnel, Großprojekt Stuttgart-Ulm, PFA 1.3a*, VE Rohbau Flughafenanbindung Los 1, Stuttgart Weinheim.

# bohren to be wild

Constructing the future is part of our daily business – on and below the surface. We follow our claim GLOBAL CONSTRUCTION UNLIMITED by designing, engineering and building one of a kind shafts, tunnels and formworks.

oestu-stettin.at

part of the family
HABAU GROUP