

Penn:
Herausforderungen im Tunnelbau Stuttgart 21/NBS Wendlingen-Ulm



Herausforderungen im Tunnelbau Stuttgart 21/NBS Wendlingen-Ulm

Dipl.-Ing. Stefan Penn, Großprojektleiter Stuttgart 21, DB ProjektBau GmbH, Stuttgart, Deutschland

Mit der Neuordnung des Bahnknotenpunkts Stuttgart durch das Projekt Stuttgart 21 und der angeschlossenen Neubaustrecke Wendlingen-Ulm stehen im Südwesten Deutschlands umfangreiche Tunnelbaumaßnahmen an. Insgesamt werden im Rahmen des Großprojekts in den kommenden Jahren 117 km neue Bahnstrecken, davon 63 km als Tunnelstrecken gebaut. Im Wesentlichen verlaufen hierbei die Tunnelstrecken in zwei parallelen eingleisigen Tunnelröhren.

Challenges in the tunnel construction Stuttgart 21/new Wendlingen-Ulm section: With the reconstruction of the Stuttgart railway junction by the Stuttgart 21 project and the connected new Wendlingen-Ulm section extensive tunnelling work is currently in progress in south-west Germany. In the next few years a total of 117 km new railway lines including 63 km in tunnels will be constructed in the major project. The tunnel sections run essentially in two parallel single-track tunnels.

Viele Menschen verbinden mit „Stuttgart 21“ in erster Linie das in der breiten Öffentlichkeit bekannteste Bauwerk: den neuen Stuttgarter Hauptbahnhof (Bilder 1 und 2). Das Projekt besteht entgegen der öffentlichen Wahrnehmung aus den beiden Teilprojekten Stuttgart 21 und der anschließenden Neubaustrecke zwischen Wendlingen und Ulm.

Gesamtprojekt S21/ NBS Wendlingen-Ulm

Der neue Hauptbahnhof in Stuttgart ist in der Öffentlichkeit das meistdiskutierte Bauwerk des Projekts. Auch abseits der öffentlichen Diskussion steht der neue Hauptbahnhof im Mittelpunkt des (Teil-)Projekts Stuttgart 21, denn der überwiegende Teil der Strecken und Tunnel im Talkessel Stuttgart dient der Anbindung des Bahnhofs. Für die Realisierung des Gesamtprojekts werden weitere Bahnhöfe, Ingenieurbauwerke und Tunnelbauten benötigt, welche nicht minder anspruchsvoll in der Baudurchführung sind. Im Tunnelbau liegen

die Herausforderungen unter anderem in den hier behandelten Themen Anhydrit, druckhaftes Gebirge und Karst.

Die Streckenlänge für Stuttgart 21 beträgt 57 km, hiervon werden circa 50 % als Schnellfahrstrecke für bis zu 250 km/h realisiert. Die Neubaustrecke zwischen Wendlingen und Ulm ist mit einer Länge von 60 km durchgängig als Hochgeschwindigkeitsstrecke geplant (Bild 3).

Teilprojekt Stuttgart 21

Mit Stuttgart 21 entsteht anstelle des bestehenden Kopfbahnhofs mit ausgedehntem Gleisvorfeld und Zulaufstrecken ein Ringsystem mit dem neuen Durchgangsbahnhof, Planfeststellungsabschnitt 1.1, und dem Abstellbahnhof Untertürkheim, Planfeststellungsabschnitt 1.6b. Mit dem Tunnel Bad Cannstatt im Planfeststellungsabschnitt 1.5 (Länge etwa 3,8 km) und dem Tunnel Ober-/Untertürkheim (circa 6 km) im Planfeststellungsabschnitt 1.6a wird der Bahnhof an das bestehende Bahnnetz Richtung Osten angebunden. Die Anbindung des

Bild 1. Neuer Glanz des Stuttgarter Hauptbahnhofs.

(Quelle: Atelier Peter Wels)



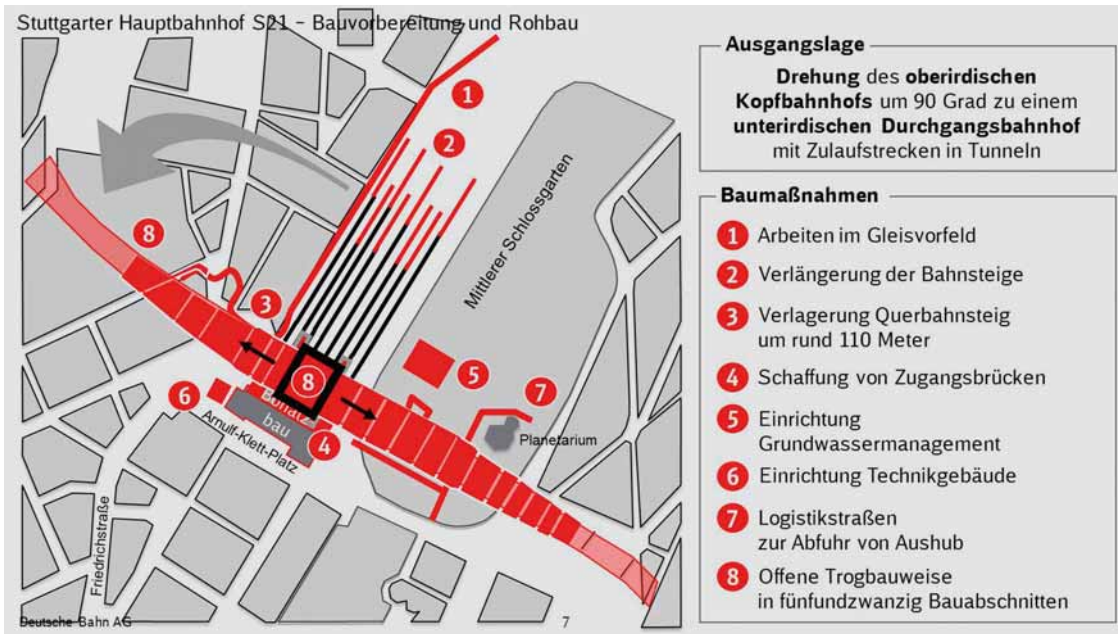


Bild 2. Baumaßnahmen für den Hauptbahnhof.

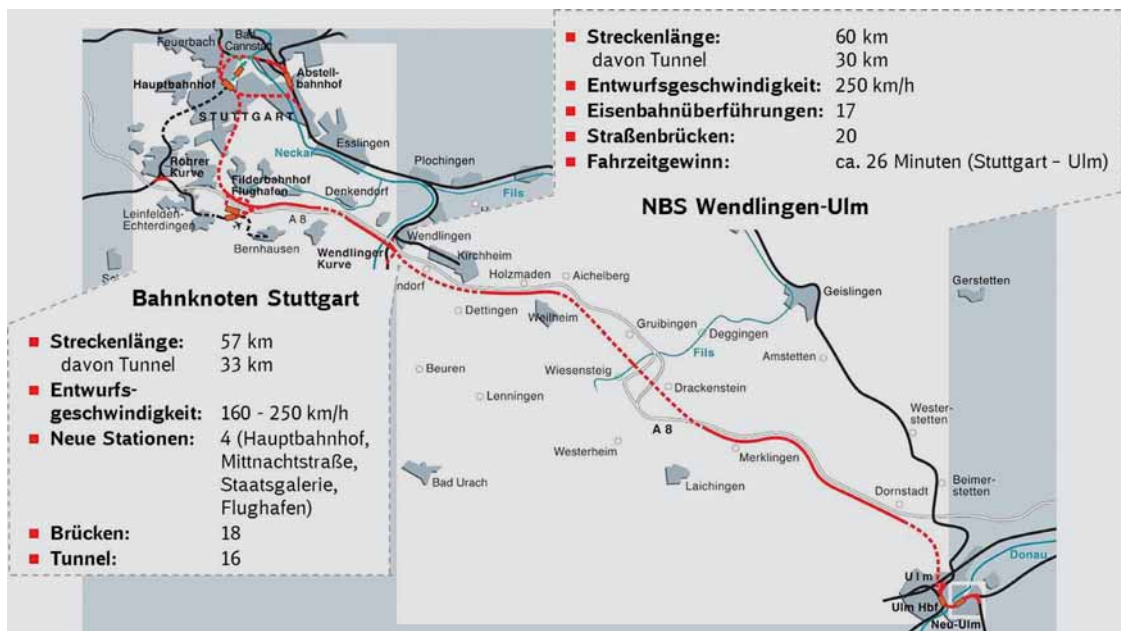


Bild 3. Übersicht der Projektdaten.

Durchgangsbahnhofs Richtung Westen beginnt bei Feuerbach, Planfeststellungsabschnitt 1.5, mit dem etwa 3,2 km langen Tunnel Feuerbach. Wird der Hauptbahnhof Richtung Süden verlassen, wird die Schnellbahnstrecke durch den circa 9,5 km langen Fildertunnel auf die Filderebene und zum Flughafen Stuttgart weitergeführt. Im Bereich des Flughafens entsteht im Planfeststellungsabschnitt 1.3 ein neuer unterirdischer Flughafenbahnhof, der neben der bereits bestehenden S-Bahnstation unmittelbar am Terminal mit Tunnelbauwerken von insgesamt etwa 4,5 km Länge an die Strecke angebunden wird. Der weiterführende Streckenabschnitt, Planfeststellungsabschnitt 1.4, in Richtung Wendlingen verläuft nicht zuletzt mit dem 700 m langen Tunnel

Denkendorf in großen Teilen in enger Bündelung mit der Autobahn A 8.

Teilprojekt NBS Wendlingen-Ulm

Aufgrund der Topografie der Schwäbischen Alb verläuft die neue Hochgeschwindigkeitsstrecke von Wendlingen nach Ulm zu etwa 50 % unterirdisch. Von Stuttgart kommend durchfährt der Zug zunächst den circa 8,2 km langen Albvorlandtunnel im Planfeststellungsabschnitt 2.1, anschließend folgt auf freier Strecke die Anfahrt auf den Böbler- und Steinbühlentunnel im Planfeststellungsabschnitt 2.2. Die beiden insgesamt 13,6 km langen Tunnelbauwerke werden nur durch die beiden 485 m

Penn:
Herausforderungen im Tunnelbau Stuttgart 21/NBS Wendlingen-Ulm

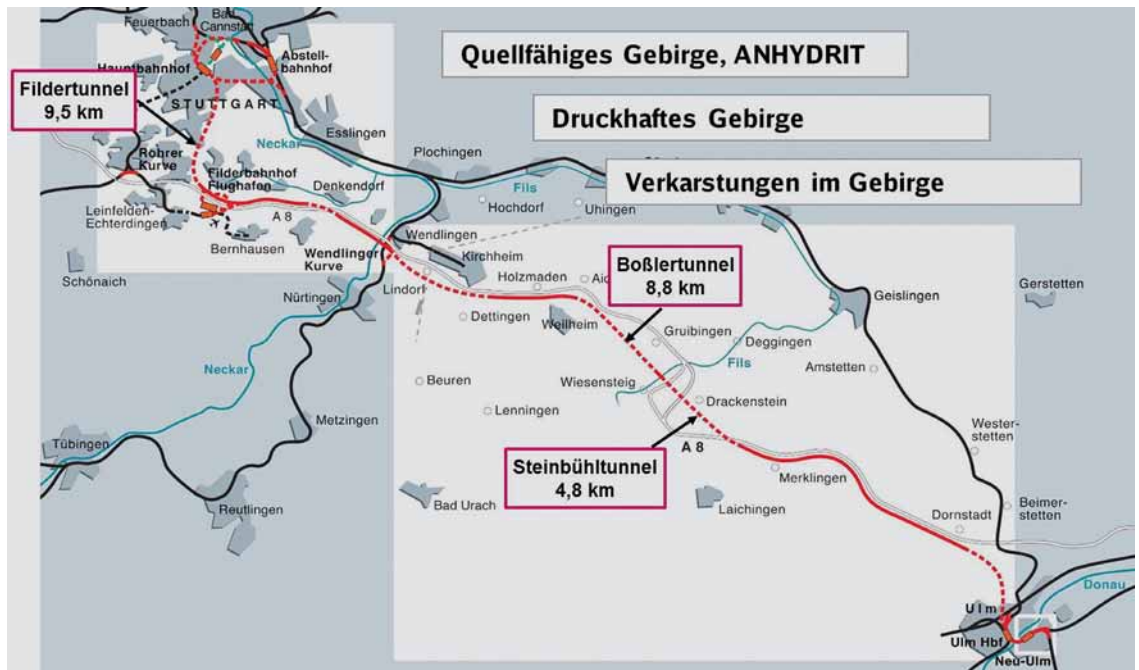


Bild 4. Übersicht der behandelten Tunnel.

langen und 75 m hohen Filstalbrücken voneinander getrennt. Auf der Albhochfläche angekommen, wird die freie Strecke weiter Richtung Ulm parallel zur A 8 geführt und mündet kurz vor Ulm in den 5,9 km langen Alabstiegstunnel, Planfeststellungsabschnitt 2.4, gefolgt vom Hauptbahnhof in Ulm, Planfeststellungsabschnitt 2.5.

Die Herausforderungen des Projekts

Das Gesamtprojekt Stuttgart 21/NBS Wendlingen-Ulm besteht neben dem bereits erwähnten Stuttgarter Hauptbahnhof aus weiteren Bauwerken, die für jeden Ingenieur eine Herausforderung darstellen. So werden drei weitere Bahnhöfe im innerstädtischen Bereich Stuttgarts und auf den Fildern gebaut, insgesamt 92 Brückenbauwerke und 26 Tunnel mit den verschiedensten Bauweisen erstellt. Für das Projekt werden circa 23 Mio. m³

Erdmassen bewegt, etwa 5,5 Mio. m³ Beton und circa 0,5 Mio. t Stahl verbaut.

Zur Erkundung der Untergrundverhältnisse in Stuttgart und auf der Schwäbischen Alb wurden im gesamten Streckenverlauf umfangreiche Bohr- und Erkundungsprogramme durchgeführt. Die folgenden drei Tunnel und ihre Herausforderungen werden exemplarisch näher betrachtet: der Fildertunnel aus dem Projekt S21 und die Tunnelbauwerke Boßler- und Steinbühlertunnel aus dem Projekt NBS Wendlingen-Ulm (Bild 4).

Fildertunnel – Bauen im quellfähigen Gebirge

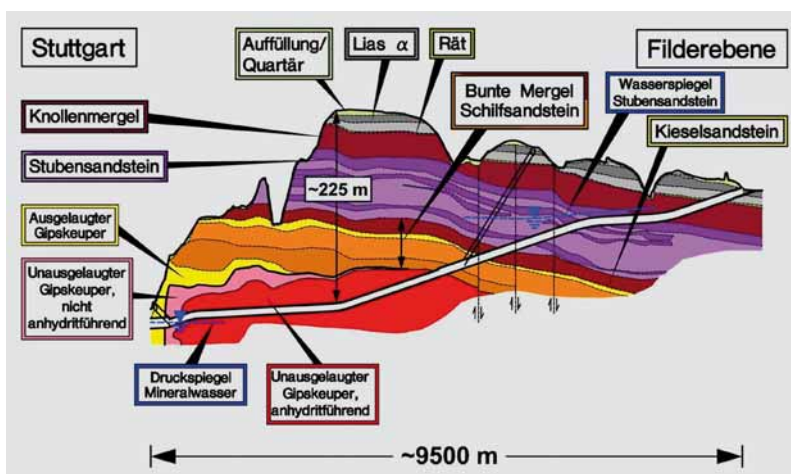
Der Fildertunnel im Planfeststellungsabschnitt 1.2 schließt zusammen mit dem Tunnel nach Ober- und Untertürkheim unmittelbar südlich an den neuen Durchgangsbahnhof an. Das Bauwerk ist mit circa 9,5 km der längste Tunnel des Großprojekts. Die Gleise verlaufen vom Bahnhof aus gesehen zunächst in zweigleisigen maulförmigen Tunnelröhren. Nach der Abzweigung des Tunnelbauwerks nach Ober- und Untertürkheim folgen zwei eingleisige Röhren mit einem Kreisprofil. Mit einer maximalen Steigung von 2,5 % wird so bis zum Portal auf der Filderebene ein Höhenunterschied von etwa 160 m überwunden.

Die Entwurfsgeschwindigkeit liegt im unteren Tunnelabschnitt bei 160 km/h, im oberen bei 250 km/h. Die Überdeckung im Anfahrbereich des Bahnhofs beträgt 9 m, nimmt aber sehr schnell zu und liegt im Bereich Degerloch bei bis zu 220 m.

Geologische Besonderheiten

In dem Bild 5 ist der geologische Längsschnitt entlang der Streckenachse des Fildertunnels dar-

Bild 5. Geologische Gegebenheiten des Fildertunnels.



gestellt. Die tiefste erkundete Schicht ist der Obere Muschelkalk. Darüber folgt der Lettenkeuper mit einer Mächtigkeit von etwa 20 m. Die Schichten des darüber liegenden Gipskeupers untergliedern sich von unten nach oben in die Grundgipsschichten, den Bochinger Horizont, die Dunkelroten Mergel, die Bleiglanzbankschichten, den Mittleren Gipshorizont und die Estherienschichten. Der Gipskeuper hat im ungestörten und unausgelaugten Zustand eine Gesamtmächtigkeit von circa 95 bis 105 m. Oberhalb des Gipskeupers folgt die zwischen circa 10 und 35 m mächtige Schilfsandsteinformation. Zu dieser zählen auch die im Hangenden des Schilfsandsteins anstehenden Dunklen Mergel. Die Schilfsandsteinformation wird von den Bunten Mergeln überlagert. Diese gliedern sich von unten nach oben in die Unteren Bunten Mergel, den Kieselsandstein sowie die Oberen Bunten Mergel. Die Gesamtmächtigkeit der Bunten Mergel beträgt circa 35 bis 50 m. Die über den Bunten Mergeln anstehende Stubensandsteinformation wurde mit Gesamtmächtigkeiten von etwa 67 bis 77 m aufgeschlossen. Der oberhalb des Stubensandsteins folgende Knollenmergel wurde in Mächtigkeiten zwischen circa 25 und 37 m angetroffen. Das den oberen Abschluss des Keupers bildende Rät besitzt im Untersuchungsraum Mächtigkeiten von circa 0,6 bis 3 m. Im Bereich des Fildertals wurden in den Erkundungsbohrungen die Schichten des unteren Schwarzzuras (Lias alpha) aufgeschlossen. Diese hier etwa 30 m mächtige Schichtenfolge gliedert sich vom Liegenden zum Hangenden in die Psilonotenschichten (Lias alpha 1), die Angulaten-schichten (Lias alpha 2) und die Arietenschichten (Lias alpha 3). Das Festgestein des Lias alpha ist zuoberst meist stark bis vollständig verwittert. Diese Zone wird als Lias-alpha-Verwitterungston bezeichnet. Oberflächennah treten quartäre Ablagerungen auf.

Auf einer Länge von circa 4.300 m verläuft der Fildertunnel im unausgelaugten Gipskeuper im Mittleren Gipskeuper und in den Estherienschichten. Die Gesteine des unausgelaugten Gipskeupers enthalten neben quellfähigen Tonmineralien auch Anhydrit, der bei Wasserzutritt in Lösung geht. Falls es im Gebirge nicht zu einem Abtransport der Lösung kommt, kristallisiert das Sulfat in Form von Gips wieder aus. Dieser Vorgang ist bekanntlich mit einer Volumenvergrößerung von etwa 60 % verbunden und würde in diesem Fall Quelldrücke auf die Tunnelschale ausüben oder – falls kein Sohlgewölbe vorhanden ist – Quellhebungen auslösen. Der mittlere Gipshorizont enthält beispielsweise etwa 20 bis 30 % Anhydrit, hier könnte eine Volumenzunahme von $0,6 \times 20\%$ bis $0,6 \times 30\%$ die Folge sein. Die bei vollständiger Verhinderung dieser Dehnung entstehenden Drücke auf die äußere Tunnelschale können sehr große Werte (bis zu circa 9 MPa) erreichen.

Vorgehensweise und Maßnahmen

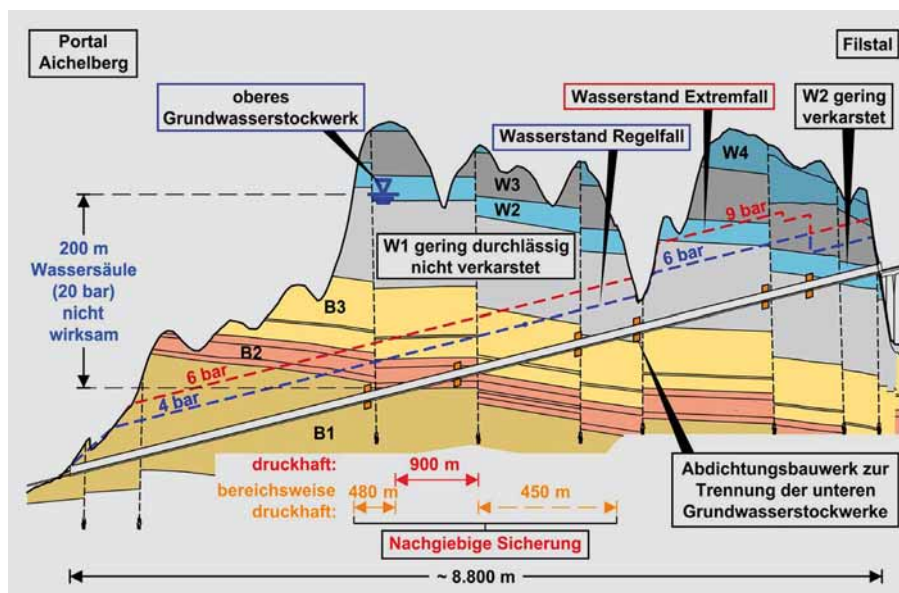
Das Entwurfskonzept für den Fildertunnel sieht vor, Wasserzutritte und damit Quellvorgänge zu verhin-

dern. Das Prof. Dr.-Ing. W. Wittke, Ingenieurbüro WBI GmbH, Aachen, Deutschland, war bereits als Gutachter und Prüfer beim Hasenbergtunnel (Los 13) und bei der Wendeschleife (Los 12) für die S-Bahn Stuttgart eingeschaltet und hat sich über viele Jahre mit der wissenschaftlichen Durchdringung dieses Phänomens befasst [1, 2, 3]. Es wurden felsmechanische Modelle und darauf aufbauende Berechnungsverfahren entwickelt, mit denen die Quellvorgänge zeitabhängig beschrieben werden können. Diese Modelle wurden unter anderem am Versuchsstollen des Freudensteintunnels kalibriert und sind die Grundlage für den Entwurf der Tunnelabschnitte des Projekts Stuttgart 21, die in diesem Gebirge liegen. Aufgrund der tief gelegten Gradienten ist der Abstand zwischen den Tunnelfirsten und der Auslaugungsfront vergleichsweise groß. Wasserzutritte von oben sind nicht zu erwarten. An den Übergängen zu den wasserführenden Schichten am Anfang und am Ende des unausgelaugten Gipskeupers werden 20 m lange Abdichtungsbauwerke errichtet, mit denen Wasserzutritte infolge von Längsläufigkeiten des Gebirgswassers parallel zur Tunnelachse verhindert werden. Da die Tunnelinnenschalen bei auftretenden Quelldrücken in der Firste durch den gesteinharten Fels gestützt werden, werden die Tunnel nach dem Widerstandsprinzip bemessen und erhalten einen Kreisquerschnitt. Während der Bauausführung sind besondere qualitätssichernde Maßnahmen vorgesehen.

Boßlertunnel – Bauen im druckhaften Gebirge

Der Boßlertunnel mit einer Länge von circa 8.800 m beginnt im Nordwesten am Portal Aichelberg. Die beiden eingleisigen Tunnelröhren verlaufen anschließend in südöstlicher Richtung. Sie unterqueren den Roten Wasen und anschließend den namensgebenden Berg, den Boßler. In diesem Bereich tritt

Bild 6. Geologische Gegebenheiten des Boßler- und Steinbühlertunnel.



Penn:
Herausforderungen im Tunnelbau Stuttgart 21/NBS Wendlingen-Ulm

die größte Überdeckung mit etwa 280 m auf. Die parallelen Tunnelröhren enden mit dem Portal Buch unmittelbar an der nördlichen Hangflanke des Filstals. Mit den Tunnelbauwerken wird auf einer Länge von 8,8 km ein Höhenunterschied von 213 m überwunden. Nicht zuletzt aufgrund der Überlagerungshöhen von bis zu 280 m ist bereichsweise mit druckhaften Gebirgsverhältnissen zu rechnen, die dadurch gekennzeichnet sind, dass die Gebirgsfestigkeit des Braunjura in Teilabschnitten geringer ist als der Gebirgsdruck. Es sind daher besondere Maßnahmen vorzusehen, um das Tunnelbauwerk sicher und wirtschaftlich zu erstellen.

Geologische Besonderheiten

Der Boßlertunnel durchfährt zwischen Aichelberg und dem Filstal von unten nach oben zunächst die überwiegend aus tonigen Gesteinen bestehenden Schichten des Braunjura (Bild 6). Im Anschluss durchfährt der Boßlertunnel mergelige und kalkige Gesteine des Weißjura. Im oberen Bereich, kurz vor dem Filstal, trifft der Boßlertunnel auf eine gebankte Kalksteinformation (Oxfordium 2). In diesem Bereich sind vereinzelt auftretende Karsterscheinungen prognostiziert.

Beim Tunnelbau im druckhaften Gebirge ergeben sich besondere Anforderungen an die Sicherung und Auskleidung des Hohlraums. Aufgrund der hohen Überlagerungsspannung bei gleichzeitig relativ geringer Gesteins- beziehungsweise Gebirgsfestigkeit treten beim Vortrieb Festigkeitsüberschreitungen und Deformationen im Gebirge auf, die bei einem steifen Ausbau und einer Behinderung der Deformationen zu sehr hohen Beanspruchungen führen. Lässt man die Gebirgsdeformationen dagegen in ausreichendem Umfang zu, so kann sich im Gebirge ein mittragendes Gewölbe mit deutlich größerer Spannweite als die Tunnelbreite ausbilden.

Dies geschieht am besten mithilfe eines temporär nachgiebigen Ausbaus, der erst nach dem Eintreten der erforderlichen Deformationen in einen steifen Ausbau überführt wird.

Vorgehensweise und Maßnahmen

Die Spritzbetonbauweise stellt für den Tunnelbau in druckhaftem Gebirge ein äußerst flexibles Bauverfahren dar. Sie bietet die Möglichkeit, den temporären Ausbau den Anforderungen entsprechend nachgiebig zu gestalten und wirtschaftlich zu bemessen. Es wurden im Rahmen der Planung Vortriebsklassen entwickelt, welche ausreichend Überprofil zum Ausgleich der Deformationen und einen temporär nachgiebigen Ausbau vorsehen.

Die Nachgiebigkeit des Ausbaus kann durch die Anordnung von Schlitzten oder durch den Einbau so genannter Stauchelemente in die Spritzbetonschale erreicht werden (Bild 7). Des Weiteren können Anker vorgesehen werden, bei denen der Ankerkopf verschieblich ausgebildet wird. Die Spritzbetonbauweise ermöglicht es somit, den temporären Ausbau des Tunnels aus Spritzbeton und Ankern im erforderlichen Maß verformbar zu gestalten, ohne dass es zur Zerstörung der Schale kommt. Nach dem Eintreten eines entsprechenden Anteils der plastischen, zeitabhängigen Verformungen des Gebirges werden die Schlitzte beziehungsweise die Knautschelemente mit Spritzbeton ausgefüllt und damit die Steifigkeit des Ausbaus hergestellt.

Steinbühlertunnel – Bauen im Karst

Am Portal Todsburg auf der südlichen Seite des Filstals beginnt der Steinbühlertunnel. Bei einer Länge von etwa 4,8 km wird bis zum Portal Hohenstadt am südöstlichen Ende des Tunnels und Beginn der Albhochfläche ein Höhenunterschied von 105 m überwunden. Aus Gründen des Natur- und Umweltschutzes wird der Tunnel vom Portal Hohenstadt aus im fallenden Vortrieb aufgeföhren. Hierbei werden die oberen Formationen des Weißjuras vom Kimmeridgium 2 über das Kimmeridgium 1 bis zum Oxfordium 2 durchfahren. Die maximale Überdeckung beträgt circa 120 m. Auf großen Teilen der Tunnelstrecke wie auch auf der anschließenden freien Strecke der Albhochfläche, Planfeststellungsabschnitt 2.3, ist mit ausgeprägten Verkarstungserscheinungen zu rechnen. Im Umfeld der Trasse sind auch größere Karsthöhlen bekannt.

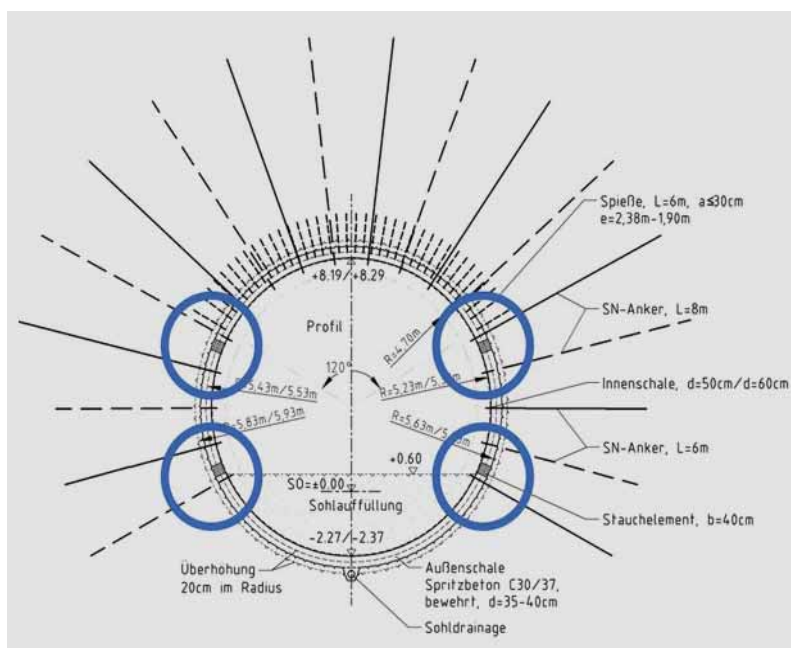
Geologische Besonderheiten

Der Steinbühlertunnel durchfährt ausschließlich Schichten des Weißjuras, die hier überwiegend aus gebankten und massigen Kalksteinen, zum Teil auch in dolomitischer Form, sowie untergeordnet aus mergeligen Gesteinen bestehen. In den Kalkstein- und Dolomitsteinschichten ist in weiten Bereichen mit Karsterscheinungen zu rechnen.

In den Schichten des:

- Oxfordium 2 ist eine mittlere Verkarstung mit offenen Spalten und vereinzelt Röhren,

Bild 7. Mögliche Ausführung des nachgiebigen Ausbaus.



- ➔ Kimmeridgium 1 ist nur eine lokale Verkarstung mit vertikal orientierten, röhrenartigen Karststrukturen,
- ➔ Kimmeridgium 2 ist eine überwiegend starke Verkarstung mit offenen Kluft- und Röhrenkarststrukturen

zu erwarten. Vorsorglich muss sich der Baubetrieb auf mögliche Hohlräume bis hin zur Höhlengröße einrichten.

Für den Steinbühlentunnel sind infolge des sehr durchlässigen Karstgebirges und der starken Abhängigkeit der Karstwasserhältnisse von der Wasserversickerung an der Oberfläche stark schwankende Wasserstände und auch stark schwankende Wasserzutritte zu erwarten. Im Karstbereich können im schlimmsten Fall Wassereinträge mit einer Zuflussrate von 1.500 l/s und einer Auslaufzeit von bis zu 8 h nicht ausgeschlossen werden.

Im Rahmen eines Prognosemodells wird davon ausgegangen, auf circa 250 Karsthohlräume in unterschiedlichen Größen und verschiedener Typen zu stoßen. Karsttypen, welche erfahrungsgemäß in den anstehenden Schichten angetroffen werden können, sind unter anderem Lochkarst, Horizontalhöhlen (Röhrenkarst), Vertikalhöhlen (Röhrenkarst), Karstgerinne und Kluftkarst. Karsthohlräume können leer, mit Wasser oder mit Versturzmateriale gefüllt sein. Das Antreffen von Karsthohlräumen stellt im Tunnelbau an die Arbeitssicherheit sowie an den späteren Eisenbahnbetrieb sehr hohe Anforderungen.

Vorgehensweise und Maßnahmen

Um die Tunnelherstellung kontrolliert und beherrschbar durchzuführen, wird baubegleitend ein aufwändiges Erkundungsprogramm durchgeführt. Dies wird in zwei Stufen untergliedert (Bild 8):

- ➔ Stufe 1: Dabei handelt es sich um direkte Erkundungen während des Vortriebs mittels einer sehr großen Anzahl vorseilender Bohrungen zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit und Standsicherheit beim Vortrieb. Werden bei diesen Erkundungen beziehungsweise beim Vortrieb Karsthohlräume detektiert, so werden diese aufgenommen und nach Erfordernis saniert. Für die Sanierung der Karststrukturen wurde ein spezielles „Karstmaßnahmen“-Sanierungsprogramm entwickelt, welches für wahrscheinlich zu erwartende Verkarstungsfälle spezielle bautechnische Maßnahmen enthält. Dieses Sanierungsprogramm wurde mit den zuständigen Oberen und Unteren Wasserbehörden abgestimmt und soll während der Baudurchführung umgesetzt werden.
- ➔ Stufe 2: Dabei handelt es sich um ergänzende Erkundungen zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebs nach der Fertigstellung des Tunnels. Nach der Auswertung der Vortriebserkundungen (Stufe 1) werden vor dem Einbau der Innenschale indirekte Erkundungen des die Tunnelröhren umgebenden Gebirges ausgeführt. Dabei wird ein radialer Bereich von circa 10 m sowie der Gesamtzwischenraum zwischen

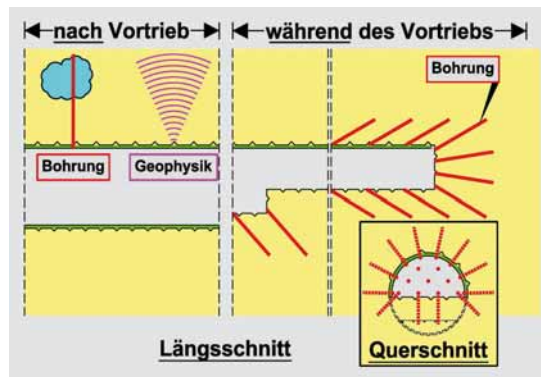


Bild 8. Erkundungsformen im Karst.

den beiden Röhren mithilfe von mindestens zwei geophysikalischen Verfahren untersucht. Werden dabei Anomalien festgestellt, werden diese mittels Bohrungen und Kamerabefahrungen näher untersucht. Anschließend wird darüber entschieden, ob und welche Maßnahmen zur Gebirgsvergütung für einen späteren, sicheren Eisenbahnbetrieb zu ergreifen sind.

Fazit

Mit dem Großprojekt Stuttgart 21/Wendlingen-Ulm werden Tunnelbauwerke in einer Region mit unterschiedlichen geologischen Herausforderungen realisiert. Auf Basis der erfolgten Voruntersuchungen, deren Erkenntnisse zu den Mineralwasser- und Anhydritvorkommen sowie zum druckhaften Gebirge und zu Karsthöhlen in den vorliegenden Planungen berücksichtigt wurden, konnte die Planungsphase erfolgreich abgeschlossen werden. In Kürze werden die Bauarbeiten zu diesen herausragenden Tunnelbauten beginnen. Nicht zuletzt durch diese Tunnelbauwerke, die beim Bau der Hochgeschwindigkeitsstrecke realisiert werden, ist auch die wesentliche Reduzierung der Fahrzeit von Stuttgart nach Ulm von 54 auf 28 Minuten möglich.

Mit freundlicher Unterstützung durch:

- ➔ Professor Wittke
- ➔ Matthias Breidenstein
- ➔ Michael Frahm
- ➔ Jochen Lutz

Quellenverzeichnis:

- [1] Der Tunnel – Verbindungsbahn der S-Bahn Stuttgart, Dokumentation ihrer Entstehung. Deutsche Bundesbahn, Bundesbahndirektion Stuttgart, (1985).
- [2] Wittke, M.: Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 13. Essen: Glückauf GmbH, heute VGE Verlag GmbH, Essen (2003).
- [3] Wittke-Gattermann, P.: Verfahren zur Berechnung von Tunnels in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 1. Verlag Glückauf GmbH, heute VGE Verlag GmbH, Essen (1998).