

Engelbergbasistunnel: Ertüchtigung der Innenschale durch eine grundlegende Änderung der Lastableitung im quellenden Gebirge – Vorversuche, bauliche und betriebstechnische Optimierungen

Der Engelbergbasistunnel wurde von 1995 bis 1999 als zweiröhriger Tunnel mit einer Länge von ca. 2.530 m (Weströhre) bzw. 2.520 m (Oströhre) in offener und bergmännischer Bauweise gebaut. Auf ca. 440 m in der Weströhre und ca. 450 m in der Oströhre liegt der Tunnel im anhydritführenden Gebirge. Innerhalb der Anhydritstrecke wurde der Tunnel im Widerstands- und im Ausweichprinzip mit Knautschzone ausgeführt. Beide Röhren weisen nach knapp 20 Jahren Betrieb auf einer Länge von ca. 180 m erhebliche Schäden in der Innenschale und den Schlitzrinnen in Form von Deformationen auf. Es sind Schädigungen am Tunnelausbau in verschiedenen Formen aufgetreten. Um eine langfristige Ertüchtigung der Innenschale und damit eine Sanierung der Schäden zu ermöglichen, wird das Konzept der Lastableitung in der Innenschale durch eine Verstärkung geändert. Die Ertüchtigung des Engelbergbasistunnels beinhaltet ebenfalls eine Optimierung und Ergänzung der bestehenden betriebstechnischen Ausstattung auf den aktuellen Stand der Technik gemäß RABT 2006.

1 Einleitung

Der Engelbergbasistunnel bei Leonberg ist Bestandteil der Bundesautobahn A 81 und befindet sich unmittelbar nördlich des Leonberger Dreiecks bei Stuttgart in Deutschland. Der Tunnel hat aufgrund seiner zentralen Lage für die Verkehrserschließung von Stuttgart eine herausragende Bedeutung und wird täglich von ca. 120.000 Fahrzeugen genutzt. Der Engelbergbasistunnel wurde von 1995 bis 1999 gebaut.

In jeweils einem Teilabschnitt des Engelbergtunnels sind seit der Fertigstellung der Tunnelröhren Deformationen und Schädigungen am Tunnelausbau durch Schwellen des Anhydrits aufgetreten. Betroffen sind folgende Abschnitte:

- Weströhre: Blöcke 64 bis 81, Länge 180 m,
- Oströhre: Blöcke 65 bis 81, Länge 170 m.

2 Geologie

Der Engelberg wird von Norden her in Nordost-Südwest-Richtung unterfahren und ist im Wesentlichen aus den Schichten des

Engelberg Base Tunnel: Refurbishing the Inner Lining by Completely Changing Load Transference in Swelling Rock – Preliminary Tests, Structural and Operational Optimisations

The Engelberg Base Tunnel was built from 1995 to 1999 as a twin-tube tunnel with a length of about 2,530 m (west tube) and 2,520 m (east tube) by cut-and-cover and mining. About 440 m in the west tube and about 450 m in the east tube of the tunnel pass through rock mass with anhydrite content. In the anhydrite section, the tunnel was constructed on the resistance and in the relaxation principle with a yielding zone. After almost 20 years of operation, both tubes show considerable damage over a length of about 180 m to the inner lining and the slot channels in the form of deformations. Various forms of damage have occurred to the tunnel lining. In order to enable long-term refurbishment of the inner lining and thus remedy the damage, the concept of load transfer into the inner lining was changed by implementing a strengthening concept. The refurbishment of the Engelberg Base Tunnel also includes the optimisation and supplementation of the existing operational equipment to the current state of the technology according to RABT 2006.

Unteren und Mittleren Keupers aufgebaut (geologische Angaben gemäß [1]). Die geologische Situation längs der Tunnelachsen ist gekennzeichnet durch die unterschiedlichen Abfolgen innerhalb des im südwestdeutschen Raum anstehenden Gipskeupers (Anhydrit). Ein bestimmendes Element im geologischen Profil ist die Engelbergverwerfung, die vom Tunnel durchfahren wird. Auf ca. 440 m in der Weströhre und ca. 450 m in der Oströhre liegt der Tunnel im anhydritführenden Gestein.

In der Anhydritstrecke der Tiefscholle wurde zwischen den Blöcken 60 bis 90 über eine Länge von ca. 260 m im Sohlbereich Tonstein mit hohem Anhydritgehalt und Schwellpotenzial angetroffen. Schon in der Vortriebsphase lösten Wasserzutritte in diesem anhydritführenden Abschnitt eine Volumenvergrößerung

des Keupers aus, die zu Sohlhebungen führten und den nachträglichen Einbau einer Knautschzone in der Sohle erforderten. Innerhalb der Anhydritstrecke wurde der Tunnel im Widerstands- und im Ausweichprinzip mit Knautschzone ausgeführt.

3 Bauwerk

Die Länge des Engelbergbasistunnels beträgt in der Weströhre (Fahrtrichtung Singen) ca. 2.530 m und in der Oströhre (Fahrtrichtung Würzburg) ca. 2.520 m. Der Tunnelquerschnitt der im Richtungsverkehr betriebenen Ost- und Weströhre entspricht einem RQ 33 T und weist eine Gesamtbreite von bis zu 16,8 m und eine lichte Höhe von bis zu 8,1 m auf. Die Fahrbahnbreite setzt sich im Wesentlichen aus drei 3,5 m breiten Fahrstreifen und einem 2 m breiten Standstreifen sowie 1 m breiten Notgehwegen zusammen. Am Südportal weiten sich beide Tunnelröhren auf vier Fahrstreifen auf (Bild 1).

Die Querschnitte des Tunnels variieren. Das Tunnelgewölbe weist im Anhydritbereich eine 3 m dicke Sohle, einen 1 m dicken



Bild 1 Südportal des Engelbergtunnels
South portal of the Engelberg Tunnel

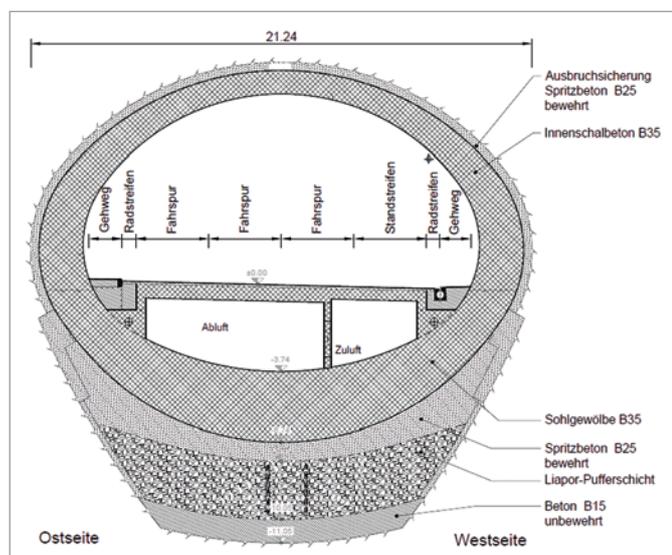


Bild 2 Querschnitt des Bestandstunnels im Bereich des Anhydrits [2]
Cross-section of the existing tunnel in the anhydrite section [2]

First und einen ca. 1,8 m dicken Ulmenbereich auf. Die Dicke der Knautschzone beträgt in der Weströhre 2,5 m und in der Oströhre 1,7 m (Bild 2).

Der Abstand zwischen den beiden Tunnelachsen beträgt bis zu 36 m. Die maximale Überdeckung von ca. 100 m befindet sich im Bereich der Tunnelmitte.

Im nördlichen Abschnitt des Tunnels wurde eine Strecke von ca. 160 m und im südlichen Abschnitt eine Strecke von ca. 350 m in offener Bauweise hergestellt. Die offenen Bauweisen im südlichen Teil des Tunnels wurden vom Portal aus auf einer Länge von ca. 230 m in der Oströhre und von ca. 240 m Länge in der Weströhre als Rechteckquerschnitt und daran anschließend die restliche Länge als Gewölbequerschnitt realisiert. Die beiden Tunnelröhren sind durch sieben nahezu gleichmäßig über die Tunnelstrecke verteilte Querschläge miteinander verbunden. Die beiden mehrgeschossigen Betriebsgebäude (BG) befinden sich jeweils zwischen den Tunnelröhren. Die hier betrachteten zu ertüchtigenden Tunnelabschnitte sind 180 m (Weströhre) und 170 m (Oströhre) lang und betreffen 18 bzw. 17 Tunnelblöcke.

4 Statisches Modell

4.1 Istzustand

Die Tunnelinnenschale wurde zunächst im Widerstandsprinzip gebaut. Wie üblich werden alle aus dem Gebirge resultierenden Lasten über Gewölbe und Sohle abgetragen. Dieses Tragwerkskonzept musste jedoch im Bereich des anhydritführenden Gipskeupers noch während der Bauausführung geändert werden. Bereits während des Vortriebs traten Verformungen des Gebirges in Form von Volumenvergrößerungen vor allem in der Sohle ein, die ihre Ursache in der Umwandlung von Anhydrit in Gips hatten, und die ein schadensfreies Herstellen der Tunnelinnenschale nicht ermöglichten. Im Bereich des anhydritführenden Gipskeupers wurde der Tunnel von Block 64 bis 90 (Weströhre) bzw. 65 bis 90 (Oströhre) anschließend nach dem Prinzip der nachgiebigen Sohlstützung mit einer Knautschzone erstellt. Somit wurden die während der Herstellung auf die Innenschale auftretenden Kräfte soweit reduziert, dass die Innenschale hergestellt werden konnte.

Nach weniger als 20 Jahren sind Deformationen und damit verbundene Schädigungen der Tunnelinnenschale in jeweils einem Teilabschnitt der mit einer Knautschzone versehenen Tunnelstrecken aufgetreten. Die gemessenen Deformationen weisen eine Ovalisierung des Tunnelquerschnitts auf. Die Firste wandert nach außen und die Ulmen konvergieren beidseitig zur Tunnelachse. Festgestellt wurden einerseits eine horizontale Konvergenz des Tunnelprofils auf Fahrbahnhöhe und andererseits horizontale Risse in den Seitenwänden des Gewölbes sowie schalenparallele Risse im Gewölbe im Fahrbahnbereich und im oberen Kämpferbereich. Die Breite zwischen den Ulmen verkürzte sich so sehr, dass die Schlitzrinnen und Kabelleerrohre eingedrückt wurden und in Form von entlastenden Schlitzern aufgebohrt werden mussten.

Die bisher durchgeführten Messungen und Untersuchungen weisen auf eine maßgeblich horizontale Druckbelastung der Tunnelinnenschale hin. Eine Prognose über den weiteren Ablauf der Belastungszunahmen bzw. über die als Ursache vermutete Volumenvergrößerung des Gebirges ist nicht möglich.

4.2 Endzustand

Aufgrund der ermittelten Deformationen und vermuteten Lastzunahmen aus dem Gebirge wurde festgelegt, die Innenschale und die Fahrbahnplatte statisch zu ertüchtigen (Bild 3). Hierzu wird eine Vorsatzschale eingebaut, die in Höhe der Fahrbahnplatte und der Zwischendecke horizontal ausgesteift wird. Die Kräfte werden von der Vorsatzschale in die Fahrbahnplatte eingeleitet.

Die Fahrbahn ist im Istzustand nur auf vertikale Lasten aus Verkehr bemessen. Die Fahrbahnplatte wird durch eine Verstärkung von unten zukünftig in der Lage sein, als horizontale Aussteifung auch horizontale Lasten aufzunehmen. Eine zweite horizontale Aussteifung wird in Form einer regelbaren Zwischendecke hergestellt werden. Die Decke wird mit einer Mittelstütze an drei Auflagerpunkten gehalten. Für die Bemessung der Fahrbahnplatte und der Zwischendecke sind als vom Bauteil aufzunehmende maximale Last 22 MN/m für die Fahrbahnplatte bzw. 14 MN/m für die Zwischendecke vorgegeben worden.

5 Ertüchtigungsmaßnahmen

Die Auswahl der Ertüchtigungsmaßnahmen erfolgte unter der maßgebenden Randbedingung, dass die Tunnel während der Bau-

ausführung nicht gänzlich für den Verkehr gesperrt werden dürfen. Der Verkehrsfluss ist stets mit mindestens einem 4+2-Verkehr am Tage und einem 4+0-Verkehr in der Nacht aufrecht zu erhalten. Dies hat zur Folge, dass die nachfolgend genannten Ertüchtigungsmaßnahmen unter Verkehr und nur etappenweise in verschiedenen Bauphasen und den damit verbundenen Verkehrsphasen ausgeführt werden können. Für die statische Ertüchtigung der Innenschale sind die folgenden Maßnahmen vorgesehen.

5.1 Fahrbahnplatte

Die 45 bis 60 cm dicke Fahrbahnplatte aus Stahlbeton ist seitlich und ungefähr in Plattenmitte vertikal gelagert. Die Fahrbahnplatte wird verstärkt und die statische Lagerung der Platte geändert. Hierzu wird unterhalb der bestehenden Fahrbahnplatte eine Stahlbetonplatte anbetoniert. Im Endzustand beträgt die Dicke der neuen Fahrbahnplatte durchgehend 105 cm. Die alte Platte und die verstärkende Platte werden miteinander durch Verbunddübel schubfest verbunden. Aufgrund der hohen aufzunehmenden Lasten sind die Fahrbahnplattenverstärkungen sehr hoch bewehrt. Schwingungsuntersuchungen an der bestehenden Fahrbahnplatte haben gezeigt, dass es möglich sein wird, die Fahrbahnplattenverstärkung unter laufendem Verkehr zu betonieren. Die Betonage der Verstärkung muss im Querschnitt in zwei Teilen erfolgen. Aufgrund des Bauens im Bestand sind die einzelnen Teile gegeneinander ohne die Möglichkeit der Durchführung von Bewehrung abzuschalen. Hierdurch sind die sehr hoch bewehrten Plattenteile mit einer Vielzahl an Schraubverbindungen auszuführen.

Weiterhin werden im bestehenden Ab- und Zuluftkanal die Mittelwand erneuert und zusätzliche Seitenwände eingebaut, die sowohl mit Zugankern in der Tunnelsohle als auch mittels statisch ausgebildeten Anschlüssen an die Fahrbahnplattenverstärkung angeschlossen werden. Hierdurch ist es möglich, in der Platte auftretende abhebende, vertikale Kräfte abzuleiten.

5.2 Bankette/Stahlbetonsockel

Durch die neue Lagerung der Fahrbahnplatte ist es möglich, die seitlichen Bankette und Stahlbetonsockel einschließlich der Kabelleerrohrführungen und Schlitzrinnen abzureißen und neu herzustellen. Die Stahlbetonsockel stellen als Rahmenecke das verbindende Element zwischen Fahrbahnplatte und Vorsatzschale her. Hierfür ist einerseits die Bewehrung der Stahlbetonsockel mittels Schraubanschlüssen anzuschließen und andererseits sind die in der Vorsatzschale eingestellten Stahlträger einzubetonieren.

In den Stahlbetonsockeln werden einseitig Längsschächte ausgespart, die nach der Herstellung und dem Aushärten der Stahlbetonsockel mit Leichtbeton verfüllt werden. Die Längsschächte werden so ausgebildet, dass ein späteres Entlasten der Platte durch Bohrungen möglich ist.

5.3 Vorsatzschale

Als nächster Schritt erfolgt die statische Verstärkung des Gewölbes in Form einer Vorsatzschale, die innerhalb des bestehenden Querschnittsprofils mit einer Dicke von 40 cm hergestellt wird. Die Vorsatzschale besteht aus geschweißten, I-förmigen Stahlträgern mit einem Achsabstand in der Regel von 50 cm, die mit bewehrtem Stahlbeton ausbetoniert werden (Bild 4). Die Stahlträger werden im Grundriss symmetrisch zur Tunnellängsachse angeordnet, um eine symmetrische Lastabtragung zu beiden Gewölbeseiten zu erhalten. Die Stahlträgerbögen werden in

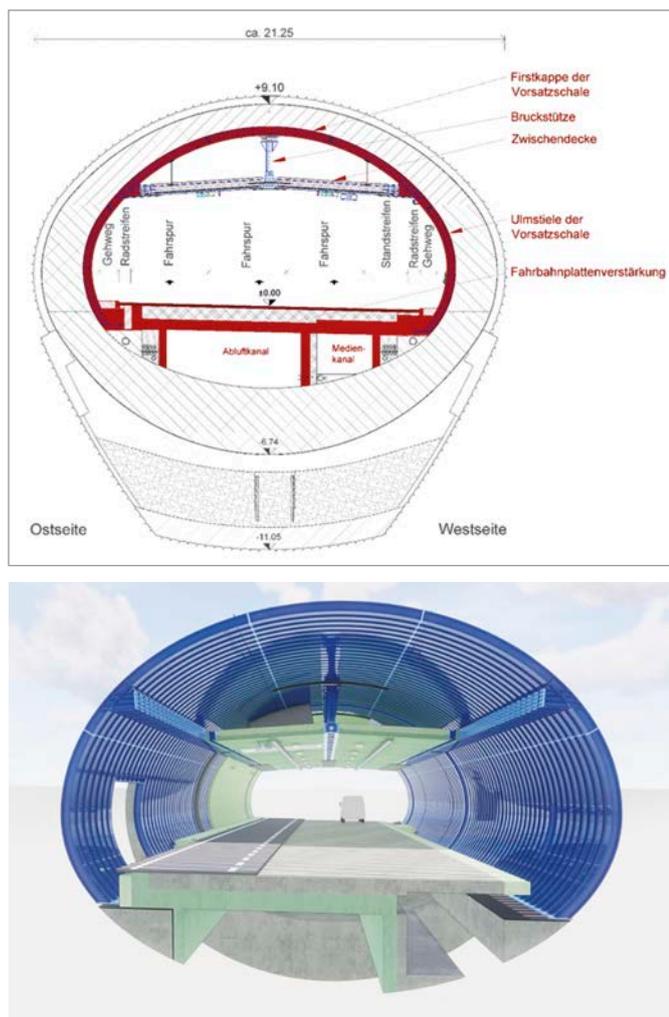


Bild 3 Ertüchtigungsmaßnahmen im Querschnitt, Ausschnitte aus Planunterlage und Visualisierung [2], [3] *Refurbishment measures in section, excerpts from design document and visualisation [2], [3]*

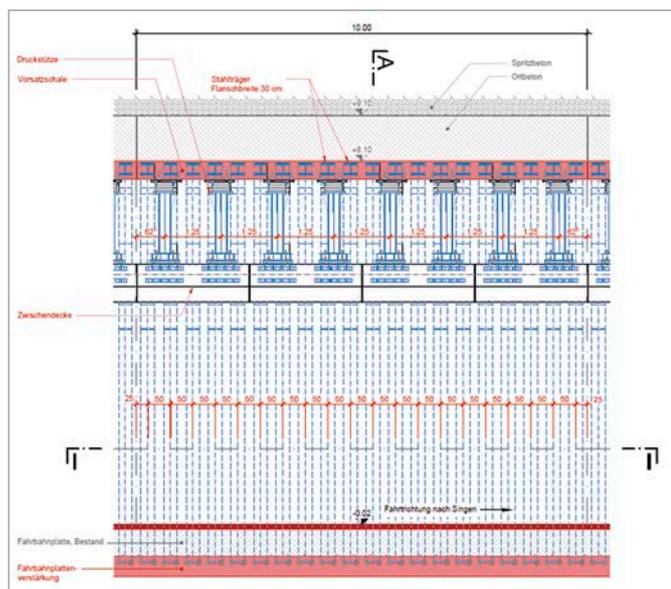


Bild 4 Stahlträgerereinteilung in der Vorsatzschale [2]
 Steel beam layout in the additional lining layer [2]

mehreren Teilen hergestellt und sind mit einer Stahlkonsole versehen, die das Widerlager für die Zwischendecke bildet. Für die Anordnung von Einbauten wie Notrufrischen oder Querschlagverschnidungen werden Sonderlösungen erforderlich, die ebenfalls einen symmetrischen Lastabtrag ermöglichen.

Vor der Betonage ist das bestehende Gewölbe für den Verbund aufzurauen und mittels Dübel mit der neu betonierten Vorsatzschale zu verbinden. Hierdurch wird ein Verbund der bestehenden Innenschale und der neu herzustellenden Vorsatzschale erzielt. Aufgrund der verkehrlichen Randbedingungen erfolgt das Herstellen der Vorsatzschale in drei Bauphasen.

5.4 Zwischendecke

Als zweites aussteifendes Element dient die Zwischendecke. Sie ist als ein Stahlverbundsegment konzipiert und dient neben der Fahrbahnplatte zur Aussteifung des Tunnels. Das Bauteil besteht aus einem Betonfertigteile, das bereits mit Stahlträgern eingebun-



Bild 5 Zwischendecke visualisiert [3]
 Intermediate slab visualised [3]

den im Werk hergestellt und segmentweise zur Baustelle transportiert wird. Nach Einbau wird das Bauteil vor Ort mit Ortbeton ergänzt. Bei Überschreitung einer Grenzkraft wird die Zwischendecke entlastet. Zu diesem Zweck ist sie als Drei-Gelenk-Konstruktion konzipiert. Sie hat ein Mittelgelenk in der Tunnelachse sowie Linienkipplager im Anschluss an die Konsolen der Innenschale. Nach dem Erreichen der Grenzkraft wird die Druckstütze verkürzt, womit sich der Stich der Zwischendecke vergrößert und die Zwischendecke entlastet wird. Die Verdrehungen der Zwischendecke geschehen in den Linienkipplagern und dem Mittelgelenk (Bild 5).

Die Zwischendecke in einem Tunnelblock besteht aus vier Segmenten mit einer Länge von 11,3 m und mit einer Breite von 2,48 m, die in nächtlichen Sperrpausen von 22 bis 5 Uhr im Tunnel versetzt und mit Ortbeton ergänzt werden. Ein Regelsegment setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen und wiegt ca. 22 t:

- Zwei Stahlverbund-Fertigteile inklusive Bewehrung für die Ortbetonergänzung, die Längsträger in Tunnelquerrichtung sind T-förmig, die Querträger in Tunnellängsrichtung sind Bleche mit Steifen,
- Zwei Mittelgelenke,
- Fünf Linienkipplager je Seite mit einer Breite von 30 cm.

Das Justieren der Zwischendeckenelemente erfolgt mit Hydraulikpressen, die in der Lage sind, die Elemente solange in Position zu halten bis die Linienkipplager mit Vergussbeton vergossen sind. Mithilfe der Pressen können die Segmente mehrmals in der horizontalen und vertikalen Lage feinjustiert werden. Sie können danach entfernt und wiederverwendet werden.

5.5 Druckstütze

Die Druckstütze wird nach der Herstellung der Vorsatzschale zwischen der Firste und dem Mittelgelenk montiert. Auf die Stütze wirken planmäßig nur Druckkräfte, Zugkräfte übernimmt sie zunächst nicht. Erst bei einer unplanmäßig großen Verformung der Zwischendecke übernimmt die Stütze die Eigenlasten der Zwischendecke und wirkt als eine Absturz-sicherung der Decke.

Dies wird durch Schrauben zwischen der Stütze und dem Mittelgelenk sichergestellt, die erst nach einem Weg von 10 cm zu wirken anfangen. Das Gewicht der Stütze beträgt ca. 450 kg. Um die Zwischendecke entlasten zu können, sind zwischen der Stütze und der Firstkappe Futterbleche vorgesehen.

5.6 Weitere Maßnahmen

Im Zuge der zuvor beschriebenen Maßnahmen erfolgt zusätzlich:

- Die Installation eines durchgehenden Messprogramms während der Bauausführung, mit dem die Belastungsabläufe in den neu hergestellten Bauteilen nachvollzogen werden und aufgrund der Ergebnisse die gegebenenfalls notwendigen Entlastungsschritte eingeleitet werden können,
- Die zusätzliche Ertüchtigung der vorhandenen Tunnelschale durch ein systematisches Verpressen der sichtbaren Risse in den Ulmen und der schalenparallelen Risse im oberen Kämpferbereich mit Zement- und Kunstharzinjektionen,
- Die Betoninstandsetzung der Innenschale in Bereichen mit festgestelltem Chlorideintrag im gesamten Tunnel,
- Die Ertüchtigung der Oberflächenbeschichtung der Tunnelinnenschale im gesamten Tunnel,



Bild 6 Versuchsaufbau Vorsatzschale – ausgeschalte Wand
Trial of additional lining – wall with formwork struck



Bild 7 Linienkipplager
Linear tilting bearing



Bild 8 Probebauteil Zwischendecke [3]
Trial building element, intermediate slab [3]

- Die betriebstechnische Ertüchtigung des Engelbergtunnels durch Optimierung und Ergänzung der bestehenden betriebstechnischen Ausstattung gemäß dem aktuellen Stand der Technik im gesamten Tunnel.

6 Vorversuche

Für die Bauteile Vorsatzschale und Zwischendecke wurden Bauteile im Maßstab 1:1 hergestellt.

6.1 Vorsatzschale

Es wurden vier Probewände hergestellt. Das Modell für die Vorsatzschale wurde an einem geraden Stück Wand mit Sichtfenstern in der Schalung sowie bewehrt und mit „Stahlträgern“ aus Holz mit den tatsächlichen Abmessungen hergestellt (Bild 6). Die Bauteilversuche an der Vorsatzschale sollten nachweisen, dass die Betonierbarkeit gegeben ist, trotz der dichten Lage der Bewehrung, des vorgegebenen Abstands der Stahlträger und der gekrümmten Form. Es wurden verschiedene Betonrezepturen getestet und die Güteeigenschaften der zu verwendenden Rezeptur festgelegt.

6.2 Zwischendecke

Für die Zwischendecke wurden das Mittelgelenk und das Linienkipplager im Maßstab 1:1 hergestellt (Bild 7). Hierbei wurden die Arbeitsabläufe für die Herstellung der einzelnen Stahlbauteile und den Zusammenbau getestet (Bild 8). Die Ergebnisse der Vorversuche führten zu einer Optimierung der Ausführungsdetails in der Ausschreibung der Bauleistung.

7 Ausblick

Die Ertüchtigungsmaßnahmen im Engelbergbasistunnel werden zur Reduzierung der schädlichen Deformationen der Tunnelinnenschale beitragen. Die Ausführung der Ertüchtigungsmaßnahmen werden im Jahr 2019 beginnen und ca. 4,5 Jahren dauern.

Literatur

- [1] Regierungspräsidium Stuttgart: Erläuterungsbericht zum Bauwerksentwurf. Stuttgart 12/2015.
- [2] Regierungspräsidium Stuttgart: Ausschreibungsunterlagen Los Hauptbaumaßnahmen Stuttgart 09/2018.
- [3] Erdmann, P., Buba, R., Berger, S.: Engelbergbasistunnel, Ertüchtigung der Innenschale durch eine grundlegende Änderung der Lastableitung im quellenden Gebirge. Vortrag 67. Geomechanik Kolloquium, Salzburg 2018. Nicht veröffentlicht.