



Prof. Dr.-Ing. W. Wittke Beratende Ingenieure
für Grundbau und Felsbau GmbH
Worldwide Engineering

WBI GmbH
Im Technologiepark 3
69469 Weinheim
Deutschland

Fon +49 6201 2599-0
Fax +49 6201 2599-110
wbi@wbionline.de
www.wbionline.de

Geschäftsführung / Management
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Walter Wittke
Dr.-Ing. Claus Erichsen
Bauass. Dr.-Ing. Bettina Wittke-Schmitt
Dr.-Ing. Martin Wittke

Registergericht Mannheim, HRB 716012
USt-IdNr. DE121687772

Nur zur Information

Bahnprojekt Stuttgart-Ulm

PFA 1.6a: Tunnel nach Ober-/Untertürkheim

**Tieferlegung der Streckenröhren
Bericht Nr. HK1**

Vortriebsbegleitende Erkundungen und
Handlungskonzepte zur Beherrschung von Wasserzutritten

Auftraggeber

DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH

Projekt Nr.

14DBS20

Dokument Nr.

2014-WBI-14DBS20 – HK1

November 2014

Planungsrechtliche
Zulassungsentscheidung
erteilt am 27. April 2015
59160-591pä/009-2014#022
Eisenbahn-Bundesamt,
Außenstelle Karlsruhe/Stuttgart

Im Auftrag

Vogt



Inhalt

1.	Aufgabenstellung	1
2.	Unterlagen	2
3.	Wasserzutritte im Bereich der Auslaugungsfront	2
4.	Schutz des Mineralwassers	5

Anlagen

1.1	Geologischer Längsschnitt Obertürkheim – HBF (Achse 62)
4.1	Prognostizierte Lage der Störung nach Unterlage [2.1]
4.2	Vorgehen Vorauseilende Erkundung Störung, Prinzip
4.3	Vorauseilende Abdichtung Störung, Prinzip
4.4	Risikoabschätzung Aufbrechen Injektionskörper

1. Aufgabenstellung

Im Zuge der Herstellung der Bohrpfehlwand für den Schacht Ulmer Straße wurde festgestellt, dass die Auslaugungsfront des Gipskeupers und damit der darüber liegende, stärker durchlässige Horizont, örtlich etwas tiefer ansteht, als durch die Erkundungen festgestellt. Das hat dazu geführt, dass die Firste des Zwischenangriffsstollens in der ursprünglich geplanten Geometrie die Auslaugungsfront anschneidet. Folgerichtig kam es beim Vortrieb zu verstärkten Wasserzutritten, die umfangreiche Abdichtungsinjektionen erforderten, um die für diesen Abschnitt planfestgestellten Wasserzutrittsmengen nicht zu überschreiten. Die Injektionen waren mit einem erheblichen technischen Aufwand verbunden.

Daher wurde entschieden, den Querschnitt des Zwischenangriffsstollens zu verkleinern und die Firste tieferzulegen. Diese Änderung hat dazu geführt, dass der Querschnitt vollständig im gering durchlässigen, unausgelaugten Gipskeuper zu liegen kommt. Die Kalotte des Stollens konnte daraufhin aufgefahren werden, ohne dass nennenswerte Wasserzutritte beobachtet wurden, obwohl die Firste über weite Strecken nur ca. 1 m unterhalb der wasserführenden Schicht zu liegen kommt.

Um die aus dem Bereich der Auslaugungsfront in die Tunnel zutretenden Wassermengen auch im Bereich der Verschneidung der Streckenröhren mit dem Zwischenangriff und im weiteren Verlauf der Streckenröhren in Richtung Hauptbahnhof möglichst gering zu halten, ist geplant, auch die Streckenröhren tieferzulegen. Durch die geplante Tieferlegung der Gradienten um max. ca. 4 m werden die Tunnelröhren nach den Ergebnissen der Erkundungen auch im Bereich des Neckartals nahezu über die gesamte Länge im gesteinsfesten, gering durchlässigen, unausgelaugten Gipskeuper zu liegen kommen (Anlage 1.1). Das ausgelaugte Gebirge wird westlich des Neckars – wenn überhaupt – nur noch über kurze Strecken angeschnitten werden, so dass die Grundwasserandrangsmengen kleiner werden dürften als sie bei der planfestgestellten Höhenlage der Streckenröhren zu erwarten gewesen wären.

Auch im Hinblick auf die zu erwartenden Senkungen an der Geländeoberfläche wirkt sich die geplante Tieferlegung wie in Unterlage [2.2] ausgeführt günstig aus.

Allerdings liegen die tiefergelegten Tunnelröhren näher an den mineralwasserführenden Schichten des oberen Muschelkalks. Zwischen der Tunnelsohle und der Oberfläche des oberen Muschelkalks liegen im Bereich des Neckartals allerdings auch nach der Tieferlegung noch min. 35 m gering durchlässiger Fels. Der Abstand ist somit auch nach der Tieferlegung noch größer als der entsprechende minimale, planfestgestellte Abstand im Bereich des Gablenbergs, der ca. 32 m beträgt und der durch die geplante Tieferlegung der Streckenröhren nicht verändert wird (Anlage 1.1). Vor diesem Hintergrund kommt auch

der SVWW zu dem Schluss, dass durch die geplante Tieferlegung der Streckenröhren keine erhöhten Auswirkungen auf die Schüttung der Heil- und Mineralquellen zu erwarten sind.

Dessen ungeachtet waren und sind Maßnahmen vorgesehen, potentielle Aufbrüche von Mineralwasser insbesondere im Bereich von Störungszonen frühzeitig zu erkennen und durch abdichtende Maßnahmen zu verhindern. Diese sind grundsätzlich im tunnelbautechnischen Gutachten (Unterlage [2.1]) beschrieben und werden im vorliegenden Bericht – ebenso wie die Maßnahmen zur Vorerkundung und Abdichtung von Wasserzutritten im Bereich der Auslaugungsfront – detailliert.

2. Unterlagen

[2.1] WBI: Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.6a. Tunnel vom Hbf nach Obertürkheim und Abzweig Wangen nach Untertürkheim. Tunnelbautechnisches Gutachten, März 2010 (Fassung vom 09.04.2010).

[2.2] WBI: S21 – PFA 1.6a: Tieferlegung der Streckenröhren, Auswirkungen auf die Geländeoberfläche, 13.08.2014.

3. Wasserzutritte im Bereich der Auslaugungsfront

Im Neckartal durchfahren die Tunnelröhren überwiegend die Schichten des unausgelaugten, nahezu anhydritfreien Gipskeupers. Allerdings sind hier nach den Ergebnissen der Erkundungen mürbe Zonen zu erwarten. In diesen unterhalb der Auslaugungsfront liegenden Zonen hat die Auslaugung des Gebirges örtlich aber nur in geringem Umfang begonnen. Man kann diese Zonen daran erkennen, dass der mittlere Wassergehalt des Gesteins gegenüber anderen Bereichen leicht erhöht ist (ca. 10 % anstatt 5 bis 6 %). Das führt zu einer etwas geringeren Festigkeit. Die Wasserdurchlässigkeit ist aber auch in diesen Bereichen sehr gering, so dass man nicht oder wenn dann nur in sehr geringem Umfang rechnen muss ($k_f = 10^{-6}$ bis 10^{-10} m/s). Beim Auftauchen der Tunnelröhren in Ober-/Untertürkheim wird die stärker durchlässige Auslaugungsfront durchfahren. Hier können wie in Abschnitt 1 erläutert, stärkere Wasserzutritte im Bauzustand nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund des Planfeststellungsbeschlusses dürfen folgende Wasserzutrittsmengen nicht überschritten werden:

- Erstwasserandrang (Prognosewert A): 28,5 l/s
- Max. dauerhafter bauzeitlicher Grundwasserandrang (Prognosewert B): 20,5 l/s

In den Bereichen in denen die Tunnelfirste im Nahbereich der Auslaugungsfront verläuft (voraussichtlich km ca. 3,6 bis 4,1 (Achsen 61 und 62), km ca. 4,1 bis 4,6 (Achse 61) und km ca. 5,3 bis 5,6 (Achse 61)), sind daher vorausseilende Erkundungen im Bereich der Firste vorgesehen (Unterlage [2.1]). Sollten die zutretenden Wassermengen die o. g. planfestgestellten Wassermengen überschreiten sind vorausseilende und/oder nachlaufende Abdichtungsmaßnahmen vorgesehen. In einem solchen Vortrieb müssen die Arbeiten bis zum Abschluss der Abdichtungsarbeiten unterbrochen werden. Vortriebe in denen nicht mit Wasserzutritten zu rechnen ist, wie beispielsweise im unausgelaugten Gipskeuper, können allerdings während dieses Zeitraums fortgesetzt werden.

In den Bereichen in denen die Tunnel in der Nähe der Auslaugungsfront liegen, sind Vortriebsklassen vorgesehen, die eine vorausseilende Sicherung mit 4 bis 6 m langen Spießern beinhalten (Klassen 6A-1/1, 7A-1 und 7A-2, Unterlage [2.1]). Wenn die Auslaugungsfront im Zuge der Spießherstellung erbohrt wird und rinnende Wasserzutritte durch das Bohrloch eintreten, wird die Herstellung des Spießschirms zunächst unterbrochen und der wasserführende Spieß wird vermörtelt bzw. am Bohrlochmund abgedichtet. Anschließend werden die nachfolgend aufgelisteten Arbeiten durchgeführt:

1. Sichern der Ortsbrust mit einlagig bewehrtem Spritzbeton mit einer Dicke von 10 cm (nur bei Vortriebsklasse 6A-1/1, da die VKL 7A-1 und 7A-2 bereits eine Ortsbrustsicherung beinhalten).
2. Durchführung vorausseilender Injektionen mit Zement oder PU-Schaum über max. 6 m lange Bohrungen. Injektionen über das offene Bohrloch, Setzen des Packers in der Spritzbetonschale bzw. der Spritzbetonsicherung der Ortsbrust. Jedes Bohrloch wird unmittelbar nach Herstellung injiziert. Die genaue Festlegung des Arbeitsablaufs und Anpassungen an die örtlichen Gegebenheiten erfolgen auf der Grundlage eines Injektionskonzepts durch Ausbaufestlegungen vor Ort. Die Injektionsdrücke müssen größer sein als der wirksame Wasserdruck. Dieser kann den zum jeweiligen Zeitpunkt wirksamen Wasserspiegel des Neckars entsprechenden Druck nicht überschreiten (max. 219 m NN bzw. 223 m NN, s. u.).
3. Nach ausreichender Abdichtung Fortsetzung des Vortriebs. Die Injektionen erfolgen im Prinzip nach dem Pilgerschrittverfahren. Das Bohrraster wird solange verdichtet, bis keine oder nur noch geringe Aufnahmemengen auftreten. Die Abdichtung wird fortgesetzt, bis kein rinnendes Wasser mehr in den Tunnelquerschnitt eintritt. Nach Erfordernis werden Vakuumlanzen angeordnet, wenn auf größeren Flächen Porenwasser zutritt und der Spritzbeton nicht haftet.

Die Spritzbetonschale wird in den Bereichen in denen die Firste in der Nähe der Auslaugungsfront liegt gegen den Wasserdruck bemessen, der sich aus dem Bemessungswasserspiegels des Neckars ergibt. Hierfür sind zwei Lastfälle vorgesehen:

- Regelfall (im Lastfall 1 zu bemessen):
219 m NN (Unterwasserbereich der Staustufe Untertürkheim) bzw.
223 m NN (Oberwasserbereich der Staustufe Untertürkheim)
- "Worst-Case" (im Lastfall 2 zu bemessen): 225 m NN.

Sollten die über die Tunnellaubung zutretenden Wassermengen wider Erwarten größer sein als die planfestgestellten Wassermengen, sind Injektionen im Bereich der bereits aufgefahrenen Tunnelröhren durchzuführen. Entsprechende Injektionsmaßnahmen können aus Gründen der Standsicherheit nur in Tunnelabschnitten durchgeführt werden, in denen der Querschnitt vollständig aufgefahren und gesichert ist, da die Schale erst dann den notwendigen Injektionsdrücken einen ausreichenden Widerstand entgegensetzen kann. Die folgenden Arbeitsschritte sind vorgesehen:

1. Lokalisierung der Wasserzutrittsstellen im Bereich der Schale.
2. Durchführung von gezielten Injektionen mit Feinstzement oder PU-Schaum (Mindestabstand zur Ortsbrust ca. 10 bis 20 m). Injektionen über ca. 1 m lange radiale Bohrungen. Setzen des Packers in der Spritzbetonschale. Genaue Festlegung des Arbeitsablaufs und Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten erfolgt auf der Grundlage eines Injektionskonzepts durch Ausbaufestlegungen vor Ort. Für die Durchführung dieser Arbeiten wird der Vortrieb in der betroffenen Röhre eingestellt.

Für die Bereiche in denen die Tunnelfirste einen größeren Abstand zur Auslaugungsfront aufweist, kann gemäß Unterlage [2.1] auf eine vorausseilende Sicherung mit Spießen verzichtet werden. In diesen Abschnitten kann im Zuge der Herstellung der 4 m langen radialen Systemankerung festgestellt werden, ob die Auslaugungsfront in die Nähe des Tunnelquerschnitts reicht. Grundsätzlich soll die Firstankerung – sofern es aus Standsicherheitsgründen möglich ist – nicht in das wasserführende Gebirge reichen. Die Länge der Anker ist insofern an die Höhenlage der Auslaugungsfront anzupassen.

Durch die oben beschriebenen Maßnahmen können Wasserzutritte aus dem Bereich der Auslaugungsfront beherrscht und begrenzt werden. Die Erfahrungen beim Vortrieb des Zwischenangriffs Ulmer Str. bestätigen diese Einschätzung.

4. Schutz des Mineralwassers

Westlich des Neckars kommen die Tunnelröhren voraussichtlich im Bereich einer Störung zu liegen (Anlagen 1.1 und 4.1, Unterlage [2.1]). Der vertikale Abstand zwischen der Tunnelsohle und der Oberfläche des oberen Muschelkalks beträgt hier nach den Ergebnissen der Erkundungen minimal ca. 35 m. Der Abstand zwischen der Tunnelsohle und der Oberfläche des Lettenkeupers beträgt an dieser Stelle voraussichtlich ca. 17 bis 18 m. In diesem Bereich ist nach Unterlage [2.1] der Aufstieg von Mineralwasser aus dem Oberen Muschelkalk über ggf. in den Störungszonen vorhandene Wegigkeiten nicht auszuschließen.

Wie in Anlage 1.1 zu erkennen, wird im Bereich der Störung ein Höhenversatz der Schichten von ca. 10 m erwartet. Nach der Tieferlegung liegen die unteren 2/3 des Tunnelquerschnitts der Achse 62 auf der östlichen Seite der Störung voraussichtlich in den Schichten des Bochinger Horizonts. Westlich der Störung liegt der Tunnel nach den Ergebnissen der Erkundungen dagegen vollständig in den Dunkelroten Mergeln. Durch vorseilende Kernbohrungen kann man somit erkennen, ob die Dunkelroten Mergel erreicht werden und somit die Störung lokalisieren.

Es wird daher empfohlen, aus der Ortsbrust ca. 30 m lange horizontale Kernbohrungen herzustellen (Anlage 4.2). Beim Abteufen der Bohrung werden in 5 m-Abschnitten WD-Tests zur Bestimmung der Durchlässigkeit durchgeführt. Die Testabschnitte werden mit einem Packer zum Bohrlochmund abgedichtet. Die Drücke werden in Stufen gesteigert. Die Versuche werden abgebrochen, wenn der Druck zu einem Aufreißen des Gebirges und damit zu einer Wasseraufnahme führt oder wenn die im Versuch aufgenommene Wassermenge ohne Aufreißen des Gebirges einen Wert von 2 bis 4 Lugeon übersteigt (1 Lugeon = $1 \text{ l} / (\text{m} \cdot \text{min} \cdot 10 \text{ bar})$). Der Druck wird maximal bis zur Druckhöhe des Mineralwasserspiegels gesteigert, der im Bereich der prognostizierten Störung bei ca. bei 233 m NN liegt.

Ggf. über die Bohrung zutretendes Wasser ist hinsichtlich der Menge und der Zusammensetzung (Mineralisation) zu untersuchen. Sollte die Störung gefunden werden und Mineralwasserzutritte bzw. eine erhöhte Durchlässigkeit festgestellt werden, ist das Bohrloch mit Hilfe von Feinstbindemittelinjektionen oder PU-Schaum über Einfachpacker zu verpressen. Anschließend ist der Vortrieb fortzusetzen bis der Abstand zwischen der Ortsbrust und der Störung ca. 5 m beträgt. Dann sind gezielte vorseilende Injektionen wie in Anlage 4.3 dargestellt durchzuführen. Anschließend können die Vortriebsarbeiten fortgesetzt werden. Sollte sich beim Vortrieb herausstellen, dass nach den durchgeführten Injektionen noch Restmineralwasserzutritte auftreten, werden nach Einbau der Spritzbetonschale weitere Injektionen aus dem rückwärtigen Raum durchgeführt (s. u.).

Zeigen die WD-Tests keine erhöhte Durchlässigkeit im Bereich der angetroffenen Störung, wird das Bohrloch mit Zementpaste verfüllt. Anschließend werden zwei weitere Bohrungen (horizontal und nach unten geneigt) durchgeführt, um das Ergebnis zu bestätigen, bevor die Vortriebsarbeiten fortgesetzt werden können.

Wenn die Bohrung keine Hinweise auf eine Störung liefern, kann das Bohrloch mit Zementpaste verfüllt werden und der Vortrieb über eine Länge von ca. 25 m fortgesetzt werden bevor eine weitere Erkundungsbohrung hergestellt werden muss.

Als Grundlage für die Bewertung etwaiger Mineralwasserzutritte und der durchgeführten WD-Tests werden vorab Sickerströmungsberechnungen durchgeführt mit denen die in den Tunnel zutretenden Wassermengen in Abhängigkeit von verschiedenen Mächtigkeiten und Durchlässigkeiten einer möglichen Störung abgeschätzt werden. Sollten im Vortriebsbereich trotz der o. g. Maßnahmen wider Erwarten infolge erhöhter vertikaler Wasserwegsamkeiten Mineralwasserzutritte erfolgen, ist ebenfalls eine Abdichtung mittels Injektionen vorzusehen. Entsprechend dem Vorgehen, das in Unterlage [2.1] für den Anfahrbereich am Hauptbahnhof beschrieben ist, ist dann zunächst die Spritzbetonschale rasch zu schließen. Gleichzeitig ist das zutretende Wasser über einen Sohlfilter zu fassen und kontrolliert abzuleiten. Anschließend kann eine Abdichtung der vertikalen Wegigkeiten durch Injektionen (Feinstbindemittel oder PU-Schaum) über Schrägbohrungen aus dem rückwärtigen Raum durchgeführt werden. Das Eintreten eines solchen Falles hat eine äußerst geringe Wahrscheinlichkeit. Das Handlungskonzept sieht dennoch Maßnahmen hierfür vor.

Auch im rückwärtigen Bereich zutretende Restwassermengen werden permanent im Hinblick auf Menge und Mineralisation überwacht (Unterlage [2.1]). Sollten Restmineralwasserzutritte festgestellt werden, sind in den entsprechenden Bereichen nachträglich Zementeinpressungen über Schrägbohrungen aus dem rückwärtigen Bereich in Analogie zu den in Anlage 4.3 dargestellten vorausseilenden Injektionen durchzuführen.

Die Injektionsparameter und das Injektionsraster werden auf der Grundlage des im Zuge der Ausführungsplanung zu erstellenden Injektionskonzepts vor Ort anhand von Ausbaufestlegungen bestimmt und an die örtlichen Gegebenheiten angepasst.

Die Spritzbetonschale wird im Bereich des Neckartals planmäßig gegen Wasserdruck bemessen (s. o.). Trotz der vorgesehenen Abdichtungsmaßnahmen sollte die Schale im Bereich der Störung gegen den, dem Mineralwasserspiegel entsprechenden Druck bemessen werden (Lastfall 3, Druckspiegel des Mineralwassers bei ca. 233 m NN). Sollte die Tunnelröhren im Sprengvortrieb aufgefahren werden, so sind die sprengbedingten Erschütterungen durch eine entsprechende Vorgehensweise so zu begrenzen, dass sich keine Beeinträchtigung der Abdichtung ergibt.

Ein sogenannter "hydraulischer Grundbruch" kann nur in dem ungesicherten Bereich an der Ortsbrust auftreten, weil unmittelbar dahinter der Querschnitt durch eine gegen Wasserdruck bemessene Spritzbetonschale gesichert ist. Es sind zwei Fälle zu unterscheiden. Für den Fall, dass kein Mineralwasser in den Tunnel eintritt und die Störung somit dicht ist, ist nachzuweisen, dass der Druck des Mineralwassers nicht zu einem Aufbruch von Gestein im Tunnel führt. Auf der sicheren Seite liegend wird angenommen, dass dieser Druck an der Unterkante der Grundgipsschichten wirksam ist. Wie oben erwähnt beträgt der minimale Abstand zwischen der Oberfläche des Lettenkeupers und der Tunnelsohle ca. 17 m. Unter Berücksichtigung des Auftriebs ergibt sich hieraus eine "Auflast" von

$$\text{ca. } 14 \text{ kN/m}^3 \cdot 17 \text{ m} = 238 \text{ kN/m}^2.$$

Der Wasserüberdruck beträgt

$$\text{ca. } 50 \text{ m} \times 10 \text{ kN/m}^3 = 500 \text{ kN/m}^2.$$

Es ergibt sich somit ein Defizit. Als Folge der Gewölbewirkung um die Tunnelröhre herum ist ca. 1 Durchmesser unter dem Tunnel allerdings in etwa die volle Auflast wirksam. Daher kann die Sicherheit gegen ein Aufbrechen unter Berücksichtigung der Überlagerung des Tunnels wie folgt ermittelt werden:

$$238 \text{ kN/m}^2 + 25 \text{ m} \cdot 12 \text{ kN/m}^3 = 538 \text{ kN/m}^2 > 500 \text{ kN/m}^2.$$

Somit kann ein Aufbruch des Gesteins ausgeschlossen werden.

Für den Fall dass die Störzone durchlässig ist muss sichergestellt werden, dass der Injektionskörper in dem ungesicherten Bereich an der Ortsbrust nicht aufbricht. Geht man davon aus, dass der Injektionsring eine Dicke von ca. 2 m hat und er ca. 1 m unterhalb des Tunnels beginnt (Anlage 4.3), so wirken an seiner Unterkante Kräfte von max. ca. 500 kN/m². Unter Berücksichtigung einer Abschlaglänge im Bereich der Sohle von 2 m ergibt sich somit auf 1 m des Umfangs eine aufwärtsgerichtete Kraft von

$$500 \text{ kN/m}^2 \times 2 \text{ m} \times "1 \text{ m}" = 1000 \text{ kN (Anlage 4.4)}.$$

Diese muss über Schub in den vertikalen Flächen die den Abschlag begrenzen abgetragen werden. Die aufnehmbare Schubspannung muss dann einen Wert von

$$\text{erf. } S = 1000 / (2 \times 2) = 250 \text{ kN/m}^2$$

haben. Dieser Wert ist deutlich kleiner als die aus der einaxialen Festigkeit für mürbe Zonen von 6000 kN/m² resultierende Kohäsion des Gesteins. Sollten die vertikalen Flächen

mit Klüften zusammenfallen, so kann man davon ausgehen, dass diese als Folge der Injektionen eine ausreichende Vergütung erfahren.

Weinheim, 13.11.2014

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'W. Wittke', written over the printed name.

Dr.-Ing. Martin Wittke

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. Wittke', written over the printed name.