



DR. SPANG

INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR BAUWESEN, GEOLOGIE UND UMWELTTECHNIK MBH

Zweckverband Hermann-Hesse-Bahn
c/o Landratsamt Calw
Herr Schwolow
Vogteistraße 42 - 46
76365 Calw

| | | | | |
|-------------|-----------------------------|--------|-----------|------------|
| Projekt-Nr. | Datei | Diktat | Büro | Datum |
| 35.4130 | P4130b200918_Bestandstunnel | Mö/SHe | Esslingen | 18.09.2020 |

Hermann-Hesse-Bahn

Reaktivierung der Bahnstrecke Weil der Stadt – Calw

Erkundung Bestandstunnel Forst und Hirsau

km 36,3+72 – 37,0+68 und

km 43,7+70 – km 44,3+24

- Ingenieurgeologisches Tunnelgutachten -

Auftrag vom 26.07.2019

Gesellschaft: HRB 8527 Amtsgericht Bochum, USt-IdNr. DE126873490, <https://www.dr-spang.de>
58453 Witten, Rosi-Wolfstein-Straße 6, Tel. (0 23 02) 9 14 02 - 0, Fax 9 14 02 - 20, zentrale@dr-spang.de

Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Christian Spang, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Spang

Niederlassungen: 73734 Esslingen/Neckar, Eberhard-Bauer-Str. 32, Tel. (0711) 351 30 49-0, Fax 351 30 49-19, esslingen@dr-spang.de
60528 Frankfurt/Main, Lyoner Straße 12, Tel. (069) 678 65 08-0, Fax 678 65 08-20, frankfurt@dr-spang.de
09599 Freiberg/Sachsen, Halsbrücker Straße 34, Tel. (03731) 798 789-0, Fax 798 789-20, freiberg@dr-spang.de
21079 Hamburg, Harburger Schloßstraße 30, Tel. (040) 524 73 35-0, Fax 524 73 35-20, hamburg@dr-spang.de
06618 Naumburg, Wilhelm-Franke-Straße 11, Tel. (03445) 762-25, Fax 762-20, naumburg@dr-spang.de
90491 Nürnberg, Erlenstegenstraße 72, Tel. (0911) 964 56 65-0, Fax 964 56 65-5, nuernberg@dr-spang.de
14480 Potsdam, Großbeerenstraße 231, Haus III, Tel. (0331) 231 843-0, Fax 231 843-20, berlin@dr-spang.de

Banken: Deutsche Bank AG, Esslingen, IBAN: DE46 6117 0024 0010 4299 00, BIC: DEUTDE33



| INHALT | SEITE |
|--|--------------|
| 1. ALLGEMEINES | 4 |
| 1.1 Projekt | 4 |
| 1.2 Auftrag | 5 |
| 1.3 Projektbeteiligte | 6 |
| 1.4 Unterlagen | 6 |
| 1.5 Untersuchungen | 9 |
| 1.5.1 Felderkundung | 9 |
| 1.5.2 Laborversuche | 11 |
| 1.5.3 Bohrkernaufnahme | 11 |
| 2. GEOTECHNISCHE VERHÄLTNISSE | 14 |
| 2.1 Morphologie, Vegetation und Bebauung | 14 |
| 2.2 Baugrund | 14 |
| 2.3 Tektonik und Trennflächen | 20 |
| 2.4 Grundwasserverhältnisse / Hydrogeologie | 22 |
| 2.5 Geotechnische Besonderheiten | 24 |
| 3. ERGEBNISSE DER BODEN- UND FELSMCHANISCHEN VERSUCHE | 25 |
| 3.1 Bodenmechanische Versuche | 25 |
| 3.2 Felsmechanische Versuche | 26 |
| 4. TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN UND KENNWERTE | 28 |
| 4.1 Klassifizierung für bautechnische Zwecke | 28 |
| 4.2 Bodenkennwerte | 29 |
| 4.3 Felsmechanische Kennwerte | 30 |
| 4.4 Homogenbereiche | 32 |
| 4.4.1 Allgemeines | 32 |
| 4.4.2 DIN 18 300 Erdarbeiten | 33 |
| 4.4.3 DIN 18 301 Bohrarbeiten | 35 |
| 4.4.4 DIN 18 312 Untertagebauarbeiten | 37 |



| INHALT | SEITE |
|---|--------------|
| 5. BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN ZUR BAUAUSFÜHRUNG | 39 |
| 5.1 Rückverankerungen ins Gebirge | 39 |
| 5.2 Flachgründung der Fundamente der Stützkonstruktion | 40 |
| 5.2.1 Flachgründung in stark verwitterten Felsbereichen und in der Störungszone | 40 |
| 5.2.2 Flachgründung im Fels | 41 |
| 5.3 Grundwasserverhältnisse / Dränagemaßnahmen | 43 |
| 6. SCHLUSSBEMERKUNG | 44 |
| 7. ANLAGEN | |
| Anlage 1: Übersichtslageplan 1: 25.000 (2) | |
| Anlage 2: Lagepläne 1: 1.000 (3) | |
| Anlage 3: Geotechnische Querschnitte 1: 100 (6) | |
| Anlage 4: Baugrundaufschlüsse (1) | |
| Anlage 4.1: Zeichenerläuterung Baugrunderkundung (2) | |
| Anlage 4.2: Bohrsondierungen (BS) (entfällt) | |
| Anlage 4.3: Rammsondierungen (DPH) (entfällt) | |
| Anlage 4.4: Kernbohrungen (BK) (19) | |
| Anlage 4.5: Schürfe (SCH) (6) Anlage 5: Bodenmechanische Laborversuche (1) | |
| Anlage 5.1: Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmungen (3) | |
| Anlage 5.2: Ergebnisse der Punktlastversuche (1) | |
| Anlage 6: Felsmechanische Laborversuche (21) | |
| Anlage 7: Kernfotos (20) | |



1. ALLGEMEINES

1.1 Projekt

Der Landkreis Calw hat den Abschnitt Weil der Stadt – Calw der „Württembergischen Schwarzwaldbahn“ (Strecke 4810) zum 01.01.1994 von der Deutschen Bahn AG übernommen und strebt seitdem eine erneute Verkehrsaufnahme als "Hermann-Hesse-Bahn" auf diesem Streckenabschnitt an. Zum 01.01.2017 ging die Vorhabenträgerschaft auf den neugegründeten Zweckverband Hermann-Hesse-Bahn (ZV HHB) über, dem zwischenzeitlich auch das Eigentum an der Infrastruktur übertragen wurde.

Der Tunnel Forst verläuft zwischen den Orten Althengstett und Ostelsheim südlich der Landesstraße L183 bei km 36,3+72 – 37,0+68. Hinter Althengstett verläuft die Bahnstrecke nahe der Bundesstraße B295 bis nach Calw. In Calw folgt die Bahnstrecke noch ein kurzes Stück der Bundesstraße B296 bevor sie nach Norden Richtung Hirsau abbiegt. Zwischen Calw und Hirsau befindet sich der Tunnel Hirsau bei km 43,7+70 – km 44,3+24. Vor Hirsau macht die Bahnstrecke eine Schleife um den Welzberg und verläuft entlang des Osthangs des Nagoldtales hinab nach Calw.

Nach Einstellung des Bahnbetriebs auf dem Abschnitt Weil der Stadt – Calw der Württembergischen Schwarzwaldbahn Ende der 1980er-Jahre sind die beiden Bestandstunnel Forst und Hirsau durch Fledermäuse bevölkert worden. Das Artenschutzrecht sowie eine aus Sicht des amtlichen und privaten Naturschutzes schwierige Umsiedlung der Tiere stellt die Wiederaufnahme des Bahnbetriebs für die geplante Hermann-Hesse-Bahn in den beiden Tunneln vor Herausforderungen. Das Platzangebot in den ursprünglich für zwei Gleise konzipierten Tunneln bietet die Möglichkeit einer Doppelnutzung in einer sogenannten Bahn- und einer Fledermauskammer.

In den beiden Bestandstunneln Forst und Hirsau der Hermann-Hesse-Bahn, die beim Bau in den 1870er Jahren für zwei Gleise ausgelegt, zukünftig aber nur eingleisig betrieben werden, soll zunächst das Tunnelgewölbe zur Herstellung der Betriebssicherheit saniert und anschließend für die dort lebenden Fledermäuse eine Schutzeinrichtung gebaut werden. Hierfür soll in den Tunneln eine durchgehende Abtrennung eingezogen werden, um die „Bahnkammer“ von der „Fledermauskammer“ abzutrennen. Diese Abtrennung erfolgt durch eine Stahlkonstruktion mit vollflächiger Ausfachung durch Lärmschutzwandelemente. Die Abtrennung der Bahnkammer von der



Fledermauskammer erfolgt mit erprobten Konstruktionen, die eine Bahnzulassung besitzen und auf die Erfordernisse der Kammerausführung angepasst werden können.

Zur Erkundung der Gebirgsverhältnisse in den Tunneln Forst und Hirsau und der Möglichkeiten einer Rückverankerung der Trennelemente von Bahnkammer zu Fledermauskammer, wurde eine ergänzende Erkundung im Bereich der beiden bestehenden Tunnel durchgeführt. In den Tunneln Forst und Hirsau wurden 7 bzw. 12 Bohrungen aus dem Tunnel heraus in das umgebende Gestein hergestellt. Ziel war die Erkundung des umgebenden Gesteins und der Hinterpackung der Gewölbe der Tunnel Forst und Hirsau.

Die Tunnelschale besteht in beiden Tunneln aus Sandsteinquadern aus dem Oberen und Mittleren Bundsandstein. Aus alten Querschnitten, in denen die Tunnelschale dargestellt ist (siehe [U 10] und [U 13]) ist zu entnehmen, dass die Tunnelschale im Bereich der Firste weniger dick ausgeführt wurde. Dem Querschnitt des Tunnels Forst ist zu entnehmen, dass die Tunnelschale im Bereich der Sohle ca. 1,20 m, auf einer Höhe von ca. 2,0 m ca. 1,00 m und im Bereich der Firste 0,70 – 0,90 m dick ist. Für das Tunnelgewölbe des Tunnels Hirsau ergab im Bereich der Sohle sich eine Dicke von ca. 0,75 – 1,00 m. Die Dicke des Tunnelgewölbes nimmt zur Firste hin ab. An der Firste dürfte die Tunnelschale eine Dicke von ca. 0,60 – 0,80 m aufweisen.

1.2 Auftrag

Ausgehend vom 11. Nachtragsangebot A35.7600 vom 02.04.2019 wurde die Dr. Spang GmbH am 26.07.2019 vom Landratsamt Calw für die Erkundung der Bestandstunnel Forst und Hirsau mit den nachfolgenden Leistungen beauftragt:

- Aufstellen eines Erkundungskonzeptes sowie Planung und Ausschreibung der Erkundungen,
- Fachtechnische Betreuung der Bohr- und Erkundungsarbeiten,
- Durchführen von boden- und felsmechanischen Laborversuchen,
- Auswerten und Darstellen der Ergebnisse der Baugrunderkundungen sowie der Labor- und Feldversuche,
- Klassifizieren des Baugrunds und Festlegen der Baugrundkennwerte,
- Aufstellen eines geotechnisch/tunnelbautechnischen Gutachtens.



1.3 Projektbeteiligte

Die Dr. Spang GmbH hat die Ausführung der zusätzlichen Erkundungsmaßnahmen in den Tunneln Forst und Hirsau im Zeitraum von August bis September 2019 fachtechnisch betreut. Ausgehend von den Erkundungsergebnissen wurde das vorliegende ingenieurgeologische Gutachten für die beiden Bestandstunnel Forst und Hirsau erstellt.

Neben der Dr. Spang GmbH haben folgende Beteiligte Leistungen im Rahmen der Baugrunderkundung erbracht:

- **Bohrleistungen:** Heinz Burkhardt GmbH & Co. KG, Neuweiler
- **Bohrlochscans:** Heinz Burkhardt GmbH & Co. KG, Neuweiler
- **Felsmechanische Laborversuche:** HTW Dresden, Fachbereich Bauingenieurwesen / Architektur, Betonprüfstelle

1.4 Unterlagen

- [U 1] **Hermann-Hesse-Bahn, Reaktivierung der Bahnstrecke Weil der Stadt – Calw, östlicher Voreinschnitt Tunnel „Forst“, Baugrundgutachten und Sicherungsempfehlungen;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, 10.06.2015.
- [U 2] **Hermann-Hesse-Bahn, Reaktivierung der Bahnstrecke Weil der Stadt – Calw, km 26,1 – km 28,6 und km 35,3 – km 47,7, Geotechnisches Streckengutachten;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, 12.10.2016.
- [U 3] **Hermann-Hesse-Bahn, Bahnstrecke Calw – Weil der Stadt, Voreinschnitte Tunnel Hirsau, km 43,580 bis 43,766 und 44,320 bis 44,370, Geotechnische Untersuchung;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, 11.06.2007.



- [U 4] **Hermann-Hesse-Bahn, Bahnstrecke Calw – Weil der Stadt, Neubau Tunnel Ostelsheim, km 28,8+86 bis 29,3+84, Geotechnisch/tunnelbautechnisches Gutachten;** Dr. Spang GmbH, Frankfurt, 30.01.2020.
- [U 5] **Bahnstrecke Calw – Weil der Stadt, Tunnel Forst km 36,373 bis km 37,068, Tunnel Hirsau km 43,766 bis km 44,320, Kurzbericht zu Mauerwerks- und Drainageuntersuchungen mit Sanierungsvorschlägen einschließlich Kostenberechnung;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, 07.09.2007.
- [U 6] **B296, Kernstadumfahrung Calw, Tunnel Calw, Geotechnisches Gutachten – Tunnelbautechnische Empfehlungen;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, 30.07.2010.
- [U 7] **B296, Kernstadumfahrung Calw, Tunnel Calw, Tunnelbautechnisches und hydrogeologisches Gutachten;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, in Bearbeitung.
- [U 8] **Wiederinbetriebnahme der Strecke Weil der Stadt – Calw (4810), Instandsetzung Tunnel Forst, Fachbeilage Wasserrechtliche Tatbestände, Antrag auf Erteilung einer planungsrechtlichen Zulassungsentscheidung;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, 02.03.2016.
- [U 9] **Wiederinbetriebnahme der Strecke Weil der Stadt – Calw (4810), Instandsetzung Tunnel Hirsau, Fachbeilage Wasserrechtliche Tatbestände, Antrag auf Erteilung einer planungsrechtlichen Zulassungsentscheidung;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, 02.03.2016.
- [U 10] **Bahnstrecke Calw – Weil der Stadt, Tunnel Forst km 36,373 bis km 37,068, Tunnel Hirsau km 43,776 bis km 44,320;** Dr. Spang GmbH, Esslingen, 07.09.2007.
- [U 11] **Hermann-Hesse-Bahn, Tunnel Forst und Tunnel Hirsau, Abfalltechnische Untersuchung;** Dr. Spang GmbH, 08.01.2019.
- [U 12] **Bahnlinie Calw – Weil der Stadt, Bauwerke von 34,278 km bis 37,613, Bauwerksbuch;** LRA Calw, Stand: unbekannt.
- [U 13] **Bahnlinie Calw – Weil der Stadt, Bauwerke von 43,766 km bis 44,320 km, Bauwerksbuch;** LRA Calw, Stand: unbekannt.



- [U 14] Daten- und Kartendienst der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg;** <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>, Stand: 20.03.2020.
- [U 15] Geologische Karte von Baden-Württemberg, Blatt 7219, Weil der Stadt, 1 : 25.000 mit Erläuterungen;** Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart, Berlin Auflage 1994.
- [U 16] Geologische Karte von Baden-Württemberg, Blatt 7218, Calw, 1:25.000 mit Erläuterungen;** Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart, Berlin Auflage 1982.
- [U 17] Geologie von Baden-Württemberg,** 5. Auflage; O.F. Geyer / M.P. Gwinner, Schweizerbart, Stuttgart, 2011.
- [U 18] Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus;** G. Girmscheid, 3. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2013.
- [U 19] Empfehlungen des Arbeitskreises „Tunnelbau“ (ETB);** Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen, 1995.
- [U 20] Hydrogeologische Methoden;** Horst-Robert Langguth, Rudolf Voigt, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2004.
- [U 21] The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice;** D. U. Deere and D. W. Deere, Philadelphia, 1988.
- [U 22] Abriss der Ingenieurgeologie;** Prinz H., Strauß R., Springer Spektrum Verlag, 4. Auflage, 2006.



1.5 Untersuchungen

1.5.1 Felderkundung

Vom 12.08.2019 bis zum 20.09.2019 wurden von der Fa. Heinz Burkhardt GmbH & Co. KG im Bereich der beiden Bestandstunnel insgesamt **19 vertikale, horizontale und schräge Kernbohrungen** mit Kernmarschlängen zwischen ca. 2 und 10 m abgeteuft. In allen 19 Bohrungen wurde ein optischer Bohrlochscan (ETIBS) ausgeführt. Die Erkundungsergebnisse fließen in das nachfolgende Gutachten ein.

Die Kernbohrungen wurden fortlaufend zu bereits ausgeführten Kernbohrungen im Bereich der Hermann-Hesse-Bahn beginnend mit der Nr. 61 für den Tunnel Forst und mit der Nr. 71 für den Tunnel Hirsau nummeriert.

Aus der nachfolgenden Tabelle sind die geometrischen und geodätischen Daten der Bohrungen der Erkundung der Bestandstunnel ersichtlich.

| Bohrung Nr. | Tunnel | Bohrlänge [m] | Neigung ¹⁾ [°] | Ansatz- höhe über SO ²⁾ [m ü. SO] | Kilometrierung |
|--------------|--------|------------------|------------------------------|---|----------------|
| BK 61 | Forst | 10 | 90 re | 4,20 | 36,4+70,39 |
| BK 62 | Forst | 10 | 90 re | 4,06 | 36,7+16,85 |
| BK 63 | Forst | 5,1 | 180 | -0,62 | 36,7+17,15 |
| BK 64 | Forst | 10 | 90 li | 4,96 | 36,7+17,15 |
| BK 65 | Forst | 10 | 10 li | 5,64 | 36,7+16,82 |
| BK 66 | Forst | 9,7 | 90 re | 4,30 | 36,9+05,06 |
| BK 67 | Forst | 9,9 | 90 re | 4,23 | 37,0+51,65 |
| BK 71 | Hirsau | 9,9 | 90 re | 4,49 | 43,8+55,35 |
| BK 72 | Hirsau | 9,6 | 90 li | 4,46 | 44,0+79,20 |
| BK 73 | Hirsau | 10 | 90 re | 4,34 | 44,0+98,07 |



| Bohrung Nr. | Tunnel | Bohrlänge [m] | Neigung ¹⁾ [°] | Ansatzhöhe über SO ²⁾ [m ü. SO] | Kilometrierung |
|--------------|--------|---------------|---------------------------|--|----------------|
| BK 74 | Hirsau | 10 | 10 re | 5,78 | 44,1+99,15 |
| BK 75 | Hirsau | 2 | 50 li | 4,91 | 44,2+17,88 |
| BK 76 | Hirsau | 2 | 20 li | 5,79 | 44,2+18,10 |
| BK 77 | Hirsau | 2,2 | 50 li | 3,83 | 44,2+48,78 |
| BK 78 | Hirsau | 2 | 20 li | 5,43 | 44,2+48,05 |
| BK 79 | Hirsau | 2 | 50 re | 4,45 | 44,3+06,75 |
| BK 80 | Hirsau | 2 | 50 li | 4,89 | 44,3+11,90 |
| BK 81 | Hirsau | 2 | 20 li | 5,55 | 44,3+11,50 |
| BK 82 | Hirsau | 2 | 50 re | 4,36 | 44,3+11,20 |

¹⁾ bezogen auf Vertikale, Blickrichtung aufsteigende Kilometrierung, mit Angabe der Tunnelseite

²⁾ bezogen auf Schienenoberkante

Tabelle 1.5-1: Übersicht geometrische und geodätische Daten Kernbohrungen der ergänzenden Erkundungen

Die Bohrungen wurden im Fels als Rotationskernbohrung mit Seilkernrohr und Wasserspülung ausgeführt.

Am 15.06.2020 wurden auf Empfehlung des Prüfsachverständigen sechs Schürfe im Bereich der Störzone des Tunnels Forst bei ca. km 36,7+00 – ca. km 36,7+30 erstellt, um weitere Hinweise zu den Baugrundverhältnissen in diesem Bereich zu erhalten. Folgende Schürfe wurden ausgeführt:

| Schurf Nr. | Tunnel | Tiefe [cm] | Lage | Ansatzhöhe unter SO ¹⁾ [m u. SO] | Kilometrierung |
|----------------|--------|------------|------------|---|----------------------|
| SCH B4a | Forst | 80 | bahnrechts | 0,80 | 36,7+06, Block 51 |
| SCH B4b | Forst | 40 | bahnrechts | 0,80 | 36,7+15, Block 52 |
| SCH B4c | Forst | 20 | bahnrechts | 0,80 | 36,7+26, Block 53-54 |
| SCH B4d | Forst | 20 | bahnlinks | 0,80 | 36,7+00, Block 50 |



| Schurf Nr. | Tunnel | Tiefe [cm] | Lage | Ansatzhöhe unter SO ¹⁾ [m u. SO] | Kilometrierung |
|------------|--------|------------|-----------|---|----------------------|
| SCH B4e | Forst | 180 | bahnlinks | 0,80 | 36,7+10, Block 51-52 |
| SCH B4f | Forst | 20 | bahnlinks | 0,80 | 36,7+21, Block 53 |

Tabelle 1.5-2: Übersicht geometrische und geodätische Daten Schürfe im Bereich der Störzone Tunnel Forst

1.5.2 Laborversuche

Im Rahmen der ausgeführten Erkundung der Bestandstunnel Forst und Hirsau ist die Festigkeit des Gesteins mittels einaxialer Druckversuche inkl. Wassergehaltsbestimmungen an 20 Proben bestimmt worden. Des Weiteren wurden 34 Punktlastversuche inkl. Wassergehaltsbestimmungen ausgeführt. Die zugehörigen Laborversuchsergebnisse wurden für das vorliegende Gutachten mit herangezogen.

| Versuch | | Norm / Regelwerk |
|---------------|---------------------------|--|
| Felsmechanik | Einaxiale Druckfestigkeit | DGGT, AK 3.3, Empfehlung Nr. 1, „Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern“, 2004 |
| | Punktlastindex | DGGT, AK 3.3, Empfehlung Nr. 5, „Punktlastversuche an Gesteinsproben“, 2010 |
| Bodenmechanik | Wassergehalt | DIN 18 121 |

Tabelle 1.5-3: Zusammenstellung der Laborversuche

1.5.3 Bohrkernaufnahme

Die Bohrkern wurden nach Fertigstellung der jeweiligen Bohrung zeitnah durch Mitarbeiter der Dr. Spang GmbH geotechnisch nach DIN EN ISO 14 688 (Boden) bzw. DIN EN ISO 14 689 (Fels) aufgenommen und nach DIN 18 196 gruppiert klassifiziert.



| Verwitterungsgrad | Beschreibung | Stufe |
|------------------------|--|-------|
| frisch (unverwittert) | Kein sichtbares Zeichen von Verwitterung des Gesteins; möglicherweise leichte Verfärbung an den Hauptoberflächen oder Trennflächen. | W 0 |
| schwach verwittert | Verfärbung weist auf Verwitterung des Gesteins und der Oberflächen der Trennflächen hin. | W 1 |
| mäßig verwittert | Weniger als die Hälfte des Gesteins ist verwittert oder zersetzt. Frisches oder verfärbtes Gestein liegt entweder als ein zusammenhängendes Steinskelett oder als Steinkerne vor. | W 2 |
| stark verwittert | Mehr als die Hälfte des Gesteins ist zersetzt oder zerfallen. Frisches oder verfärbtes Gestein liegt entweder als ein zusammenhängendes Steinskelett oder als Steinkerne vor. | W 3 |
| vollständig verwittert | Das gesamte Gestein ist zu Boden zersetzt und/oder zerfallen. Die ursprüngliche Gebirgsstruktur ist größtenteils noch unversehrt. | W 4 |
| zersetzt | Das gesamte Gestein ist zu Boden umgewandelt. Die Gebirgsstruktur und die Gesteinstextur sind aufgelöst. Das Gesteinsvolumen ist stark verändert, aber der Boden hat sich nicht wesentlich bewegt. | W 5 |

Tabelle 1.5-4: Verwitterungsgrad in Anlehnung an DIN EN ISO 14 689-1, Tabelle 13

Die **Beschreibung der Gesteinsfestigkeit** sowie des **Verwitterungsgrades** bei der Kernaufnahme (siehe Anhang) erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 14 689-1. Eine Übersicht der verwendeten Begriffe ist in den Tabellen 1.5-3 und 1.5-4 enthalten. Die weitere Beschreibung der Locker- und Festgesteine erfolgte in Anlehnung an DIN 4022 / 4023.

| Stufe | Bezeichnung | Beschreibung Feldversuch | σ_c [MN/m ²] |
|-------|------------------------|---|------------------------------------|
| R 0 | außerordentlich gering | mit Fingernagel leicht ritzbar | < 1 |
| R 1 | sehr gering | mit Messer ritzbar; durch feste Aufschläge mit der Spitze des Geologenhammers zu zerbröckeln | 1 - 5 |
| R 2 | gering | mit Messer nur schwer ritzbar; durch feste Aufschläge mit der Spitze des Geologenhammers schwach einkerbbar | 5 – 25 |
| R 3 | mäßig hoch | mit Messer nicht mehr ritzbar; durch einen einzigen festen Schlag mit dem Geologenhammer zu zerbrechen | 25 – 50 |
| R 4 | hoch | nur durch mehrere Schläge mit dem Geologenhammer zu zerbrechen | 50 - 100 |



| Stufe | Bezeichnung | Beschreibung Feldversuch | σ_c [MN/m ²] |
|-------|----------------------|---|------------------------------------|
| R 5 | sehr hoch | nur durch sehr viele Schläge mit dem Geologenhammer zu zerbrechen | 100 – 250 |
| R 6 | außerordentlich hoch | durch Schläge mit dem Geologenhammer lösen sich nur Splitter | > 250 |

Tabelle 1.5-52: Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit von Gestein im Feld nach DIN EN ISO 14 689-1, Tabelle 5

Zur weiteren Klassifizierung des Gebirges wurde an den Bohrkernen der **RQD-Wert** nach DEERE bestimmt (Deere et al. 1967) [U 21] und neben dem Bohrprofil aufgetragen (siehe Anlage 4.4).



2. GEOTECHNISCHE VERHÄLTNISSE

2.1 Morphologie, Vegetation und Bebauung

Die Strecke der Hermann-Hesse-Bahn verläuft im Untersuchungsbereich (km 35,3 - 36,4) zwischen Ostelsheim und Althengstett geradlinig aus östlicher Richtung kommend nach dem höhengleichen Übergang über die L 183 vollständig in Einschnittlage. Die Kilometrierung steigt von Weil der Stadt nach Calw an. Die Strecke steigt von ca. 490 mNN bei km 35,3 auf ca. 512 mNN am Tunnelportal bei km 37,6 an. An den 1872 fertiggestellten östlichen Voreinschnitt Forst schließt der 696 m lange Tunnel Forst an, mit dem die Strecke den ca. 550 mNN hohen Geländerücken Forst durchfährt. Unmittelbar im Anschluss an den Tunnel geht die Strecke im westlichen Voreinschnitt in eine Rechtskurve in Richtung Althengstett über.

Von Althengstett führt die Bahnstrecke hinab nach Calw-Heumaden und biegt dort aus einer Linkskurve in Anschnittslage nach Norden in den Voreinschnitt Süd des Tunnels Hirsau. Die Bahnstrecke durchquert den Welzberg mit dem 554 m langen Tunnel Hirsau bei km 43,7 – 44,3. Hinter dem Tunnel Hirsau folgt der nördliche Voreinschnitt Forst und anschließend die EÜ Tälesbach bei km 44,5+10 in geländegleicher Lage, um anschließend eine Kehrschleife um den Welzberg herum zu machen.

2.2 Baugrund

2.2.1 Geologischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet ist Teil der Südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft. Diese wurde durch die Anhebung des Schwarzwaldes geprägt. Die für die Landschaftsgenese bedeutsame geologische Formation ist der Muschelkalk. Er gehört zum Schichtkomplex der Germanischen Trias. Vor etwa 240 Millionen Jahren wurden die Schichten des Muschelkalks abgelagert. Namensgebend war hier der an Fossilien reiche Kalkstein, welcher im Unteren und Mittleren Muschelkalk auftritt. Unterhalb der Muschelkalkformation folgen die Schichten des Buntsandsteins.

Die lithostratigraphische Untergruppe des Mittleren Muschelkalks besteht aus drei Formationen (Karlstadt-Formation - m4, mmK, Heilbronn-Formation - m5, mmH und Diemel-Formation - m6,



mmD) und hat in der Region eine Restmächtigkeit von ca. 30-35 m. Aufgrund oberflächennaher Verwitterung wurde ein ursprünglich hoher gesteinsbildender Anteil an löslichen Mineralen vollständig ausgelaugt. Die sedimentären Schichten sind daher stark gestört in ihrer Lagerung, stark verwittert und in ihrer Mächtigkeit stark vermindert. Die unausgelaugte Mächtigkeit des Mittleren Muschelkalks beträgt ca. 100 m.

Der Tunnel Forst kommt nach [U 16] vollständig in den hell- bis dunkelgrauen stark kalkhaltigen, dolomitischen, massigen bis dick gebankten unverwitterten Dolomit- und Kalksteinen der Karlstadt-Formation (Schicht 5b) zum Liegen. Im Bereich der Hengstetter Keupergraben-Verwerfung sind die Dolomit- und Kalksteine der Karlstadt-Formation bereichsweise stark verwittert bis zersetzt (Schicht 5a). In diesem Bereich ist ein starker Zutritt von Grundwasser festzustellen.

In der Störungszone des Hengstetter-Keupergrabens treten als Hangendes Schichten des Keupers (Lettenkeuper – kuE und Gipskeuper – kmGr) auf.

Im tieferen Untergrund des Tunnels Forst folgen unterhalb des Unteren Muschelkalks die Schichten des Buntsandsteins.

Gemäß [U 16] liegt der Tunnel Hirsau auf der gesamten Länge und Höhe im Hauptbuntsandstein (sm, Mittlerer Buntsandstein). Hierbei handelt es sich um gebankten Quarzsandstein, meist hellroter Färbung mit bereichsweisen eingeschalteten weißen Schichten. Die Korngröße der Einzelkomponenten wechseln von fein- über mittel- hin zu grobkörnigen Sandkörnern. Soweit der Sandstein Bindemittel enthält, ist nach [U 16] häufig kieseliges und karbonatisches Bindemittel zu beobachten, lokal tritt auch toniges Bindemittel auf. Ohne erkennbare Gliederung sind in die Sandsteinschichten bis zu 1 m mächtige, zu rascher Verwitterung neigende Tonsteinschichten eingeschaltet, die in Aufschlüssen häufig zur Unterschneidung der verwitterungsbeständigeren Sandsteinschichten führen. Die Sandsteinschichten führen weiterhin bereichsweise grobe Quarzgerölle. Die Verwitterungsbeständigkeit nimmt in Abhängigkeit des Bindemittels von kieseligen über karbonatischen hin zu tonigen bzw. nicht vorhandenem Bindemittel ab.

Die sedimentären Schichten fallen regional mit ca. 2 - 3° in südöstliche Richtung [U 17] ein.



2.2.2 Schichtenfolge

Bei den Erkundungsbohrungen in den Bestandstunneln sind folgende Gesteinsschichten aufgeschlossen worden. Die Schichtnummern wurden entsprechend der Nummerierung der bereits zu der Hermann-Hesse-Bahn erstellten Baugrundgutachten gewählt, weshalb sich keine fortlaufenden Schichtnummern ergeben. Die Keuperschichten aus dem Hengstetter-Keupergraben wurden als Schicht 9 zusätzlich mitaufgeführt.

| Schicht Nr. | Kurzzeichen | Bezeichnung | Schichtmächtigkeit [m] | Bodenbeschreibung | |
|-------------|-------------|--|---------------------------|--|--|
| | | | | Kornverteilung/ Farbe | Konsistenz/ Lagerungsdichte |
| 1b | A | Auffüllung / Gleis-schotter (gemischt-körnig) ¹⁾ | < 1,2 | Kies, sandig, tonig, grau, rot | mitteldicht bis locker, weich bis halbfest |
| 1d | A | Tunnelgewölbe ¹⁾ | 0,7 – 1,2 | Sandstein, angewittert, rot | Werkstein, angewittert, verwittert |
| 1e | A | Hinterpackung Tunnelgewölbe ¹⁾ | 0,1 – 1,0 | Teerabdichtung, Beton, Ziegel / Sand, Kies, schwarz, grau, ziegelrot | - |
| 5a | m4, mmK | Karlstadt-Fm. (Mittlerer Muschelkalk) ¹⁾ , stark verwittert bis zersetzt | 30 – 35 | Dolomitstein, Kalkstein grau, braun | weich-halbfest (locker) |
| 5b | m4, mmK | Karlstadt-Fm. (Mittlerer Muschelkalk) ¹⁾ , frisch (unverwittert), mäßig verwittert | 30 – 35 | Dolomitstein, Kalkstein, grau | Fels |
| 8a | soP/sm/sVs | Sandsteine des Oberen und Mittleren Buntsandsteins ¹⁾ , stark verwittert bis zersetzt | 1 - 4 | Sandstein, geringmächtige Tonstein-Zwischenlagen, rot | Fels, verwittert |



| Schicht Nr. | Kurzzeichen | Bezeichnung | Schichtmächtigkeit [m] | Bodenbeschreibung | |
|-------------|----------------|--|---------------------------|---|--------------------------------|
| | | | | Kornverteilung/ Farbe | Konsistenz/ Lagerungsdichte |
| 8b | soP/sm/ sVs | Sandsteine des Oberen und Mittleren Buntsandsteins u frisch (unverwittert), mäßig verwittert ¹⁾ | > 200 | Sandstein, geringmächtige Tonstein-Zwischenschichten, rot | Fels |
| 9 | kuE/km Gr | Lettenkeuper und Gipskeuper | 20 - 30 | Wechsellagerung von Ton- und Sandstein (kuE) bzw. Tonstein (kmGr), grau, rotbraun, graugrün, braun, violett, grün, weißgrau | Fels |

1) nicht in allen Bohrungen erkundet

Tabelle 2.2-1: Schematischer Baugrundaufbau

Schicht 1b - Auffüllungen (gemischtkörnig): Es wurden in den allermeisten Aufschlusspunkten im direkten Gleisbereich oberflächennah mindestens geringmächtige Auffüllungen, zunächst als Gleisschotter, z.T. nur als Ausgleichsschicht an der Tunnelsohle angetroffen. Bei den Auffüllungen unterhalb des Gleisschotters handelt es sich um feinsandige bis sandige, schwach bis stark schluffige, teilweise tonige Kiese oder schwach kiesige Schluffe und Sande. Die Auffüllungen bestehen auch aus kiesigen, feinsandigen, tonigen Schluffen, die inhomogen ausgebildet sind und Kalkstein-, Sandstein-, und Dolomitstein-Bruchstücke enthalten. Die Konsistenz der Schluffe reicht von weich und steif bis halbfest bzw. es liegt nach der Bodenansprache eine mitteldichte bis lockere Lagerung vor. Das tonige Material weist teilweise auch weiche Konsistenzen auf. Die Farbe der Auffüllungen reicht von grau, gelbbraun, beige bis bunt.

Schicht 1d - Tunnelgewölbe: Das Tunnelgewölbe besteht aus Werksteinen des Oberen bzw. Mittleren Buntsandsteins. Der Obere bzw. Mittlere Buntsandstein besteht aus rotem, plattigem Sandstein mit teilweise stark tonigen Zwischenschichten. Der teilweise feinsandige Sandstein enthält tonige Lagen, und der grobkörnigere Sandstein führt Quarzgerölle. Die roten bis weißlichen



Sandsteine zerfallen insbesondere an Tonsteinzwischenlagen. Diese sind selbst oft mürbe, z.T. komplett entfestigt und zu Ton zersetzt.

Schicht 1e - Hinterpackung Tunnelgewölbe: Die Hinterpackung des Tunnelgewölbes besteht direkt am Tunnelgewölbe i.d.R. aus einer Teerpappenabdichtung und anschließend aus einer 20-30 cm breiten Hinterpackung aus Beton und Ziegel. Die Bestandteile der Hinterpackung wurden nicht in allen Bohrung angetroffen. In einzelnen Bohrungen wurden keine Elemente der Hinterpackung, in anderen Bohrungen beispielsweise nur eine Hinterpackung aus Beton angetroffen. Bei dem Bau der Tunnel Forst und Hirsau wurde die Lücke zwischen dem Tunnelgewölbe und dem anstehenden Gestein mit Gesteinsbrocken aus dem Tunnelausbau aufgefüllt und das Gewölbe kraftschlüssig an das Gebirge angeschlossen.

Schicht 5 - Karlstadt-Formation (Dolomitstein, Kalkstein, unverwittert - angewittert) (Mittlerer Muschelkalk, m4, mmK, früher auch Geislingen-Fm.): Im Bereich des Tunnels Forst wurden in den in den Aufschlüssen hell- bis dunkelgraue, braune, massige bis dick gebankte unverwitterte Kalksteine und Dolomitsteine angetroffen. Untergeordnete Bereiche von Klüften und Schichtfugen zeigten Zeichen höherer Verwitterung, dies stand meist mit wasserführenden Schichten in Zusammenhang. Die Unterkante der Schicht wurde nicht direkt aufgeschlossen.

Das Gestein ist meist dicht und zeigt geringe, mäßig hohe, schichtweise auch hohe Festigkeiten und eine überwiegend gute Kornbindung. Sedimentäre Strukturen sind als feinlaminierte z. T. wellige Schichtung, teilweise deutlicher Bioturbation erkennbar.

Eine felstechnische Klassifizierung der Festigkeit (DIN EN ISO 14689-1, Tab. 5) und des Verwitterungsgrads (DIN EN ISO 14689-1, Tab. 13) ergibt für die Schicht 5 (Karlstadt-Formation, Mittlerer Muschelkalk, unverwittert) überwiegend eine Einstufung in die **Festigkeitsklassen R3-R5** und **Verwitterungsgrad W3-W0**. Bautechnisch handelt es sich um frischen, unverwitterten bis stark verwitterten Fels (Schicht 5b). In der Bohrung BK 63 und BK 65 wurde die Schicht 5 im Bereich der Störungszone als stark verwitterter bis zersetzter Fels angetroffen. In diesen beiden Kernbohrungen ist die Schicht 5 in die Festigkeitsklassen R0 bis R1 (außerordentliche bis sehr geringe Druckfestigkeiten nach DIN EN ISO 14689-1) und in den Verwitterungsgrad W4-W5 einzustufen (vollständig verwittert bis zersetzt) (Schicht 5a). Diese starke Verwitterung mit einhergehendem Festigkeitsverlust ist in Zusammenhang mit der nahen Störungszone mit starkem Grundwasserzutritt zu sehen.



Schicht 8a - Sandsteine des Oberen und Mittleren Buntsandsteins, verwittert: Der verwitterte Obere und Mittlere Buntsandstein besteht aus rotem, plattigem Sandstein mit teilweise stark tonigen Zwischenschichten. Der teilweise feinsandige Sandstein enthält tonige Lagen. Der grobkörnigere Sandstein führt Quarzgerölle. Die roten bis weißlichen Sandsteine zerfallen insbesondere an Tonsteinzwischenlagen. diese sind selbst oft mürbe, z.T. komplett entfestigt und zu Ton zersetzt. Der Verwitterungsgrad und die Unterkante der Schicht 8a hängt von der Überdeckung des anstehenden Gebirges ab.

Eine felstechnische Klassifizierung der Festigkeit (DIN EN ISO 14689-1, Tab. 5) und des Verwitterungsgrades (DIN EN ISO 14689-1, Tab. 3) ergibt für die Schicht 8a typischerweise eine Einstufung in die **Festigkeitsklasse R0 - R1** und **Verwitterungsgrad W4 - W3**. Bautechnisch handelt es sich um verwitterten Fels.

Schicht 8b - Sandsteine des Oberen und Mittleren Buntsandsteins unverwittert (soP/sm): Die stratigraphisch tiefste Schicht bilden die dichten, unverwitterten, roten bis weißlichen Sandsteine des Oberen und Mittleren Buntsandsteins. Diese bilden den tieferen Untergrund der Strecke zwischen Calw-Heumaden und dem Endpunkt der Hermann-Hesse-Bahn im Nagoldtal.

Eine felstechnische Klassifizierung der Festigkeit (DIN EN ISO 14689-1, Tab. 5) und des Verwitterungsgrades (DIN EN ISO 14689-1, Tab. 3) ergibt für die Schicht 8b (Verwitterungsschutt, Hangschutt auf Buntsandstein) typischerweise eine Einstufung in die **Festigkeitsklassen R3 (untergeordnet R4)** und **Verwitterungsgrad W2 - W0**. Bautechnisch handelt es sich um mäßig verwitterten bis frischen Fels.

Schicht 9 – Tonstein (-Wechselagerung) des Lettenkeupers und Gipskeupers (kuE/kmGr): Im Bereich des Hengstetter Keupergrabens stehen als Hangendes Schichten des Lettenkeupers (kuE) bzw. des Gipskeupers (kmGr) an. Der graue, selten rotbraune, graugrüne und braune Lettenkeuper besteht aus einer Wechselagerung von Ton-, fein- bis mittelkörnigem Sandstein und Dolomitstein.

Die stratigraphisch höher liegenden Schichten des Gipskeupers bestehen aus meist dolomitischen und gipshaltigen, rotbraunen, violetten, grünen, grauen Tonsteinen mit eingeschalteten Dolomitsteinlagen. Im Schichtverband sind die Gesteine des Gipskeupers z.T. ausgelaugt bzw. auch aufgelockert.



Die Schichten des Lettenkeupers (kuE) und Gipskeupers (kmGr) wurden in den Aufschlussbohrungen nicht angetroffen. Um ein vollständiges Bild des Tunnels Forst zu zeigen, wird auf diese Schichten hier kurz eingegangen.

Der Untergrundaufbau stimmt grundsätzlich mit den stratigraphischen Angaben der geologischen Karte [U 16] überein.

Folgende Erkenntnisse haben sich aus der Erstellung der sechs Schürfe im Bereich der Störzone des Tunnels Forst ergeben.

Die Lage des Entlastungsgewölbes zu beiden Seiten der Bahngleise lässt darauf schließen, dass hier im Zuge des Tunnelbaus eine Schwächezone zu überbrücken war. Diese Schlussfolgerung kann durch die Aufschlüsse bahnrechts nicht exakt bestätigt werden. Am östlichen Ende des bahnrechten Entlastungsgewölbes bei Block 51 wurde tragfähiger Fels mit Verwitterungsgrad w2-w3 erst ab 0,3 m unter derzeitiger Sohle (ca. 1,1 m u. alter SO) und erst ab 0,8 m unter derzeitiger Sohle (ca. 1,6 m u. alter SO) mit Verwitterungsgrad w1-w2 angetroffen. Im Gegensatz dazu wurde in der Mitte des bahnrechten Entlastungsgewölbes tragfähiger Fels mit Verwitterungsgrad w1-w3 unmittelbar unter derzeitiger Sohle (ca. 0,8 m u. alter SO) angetroffen.

Bahnlinks bestätigen die Schürfe, dass im Bereich der Mitte des Entlastungsgewölbes Baugrund mit geringer Tragfähigkeit und an den Enden des Entlastungsgewölbes tragfähiger Fels unmittelbar auf der Tunnelsohle ansteht.

Nach den Ergebnissen der Schürfe kreuzt die Störung den Bahntunnel rechtwinklig zur Tunnelachse, da der Bereich mit geringerer Tragfähigkeit sowohl bahnlinks als auch bahnrechts angetroffen wurde.

2.3 Tektonik und Trennflächen

2.3.1 Regionale tektonische Verhältnisse

Die sedimentären Schichten fallen regional mit ca. 2 - 3° in südöstliche Richtung [U 17] ein. Zwischen Weil der Stadt und Calw quert die Strecke an vier Stellen größere Verwerfungen und Störungszonen.



Alle folgen einer nordwestlich-südöstlichen Orientierung parallel der Haupttrichtung des nördlich gelegenen Fildergrabensystems und der regionalen Großstrukturen.

Die erste Störung verläuft quer zum Würmtal bei ca. km 27,5.

Die zweite Großstruktur, der "Hengstetter Keupergraben" eine ca. 30 - 50 m breite Grabenbruchstruktur quert die Strecke im Tunnel Forst ungefähr in dessen Mitte. In diesem schmalen, von Nordwesten nach Südosten verlaufenden Graben sind in der Grabenscholle die Schichten des Unterkeupers (Grabfeld-Formation des Gipskeupers - kmGr) oberflächlich aufgeschlossen. Die im Tunnel gefassten ergiebigen Quellen stehen mit den Störungszonen in direktem Zusammenhang. Die Schichten des Unterkeupers konnten in den Bohrungen im Bereich der Störungszone nicht angetroffen werden.

Eine weitere Störungsschar befindet sich nach der geologischen Karte [U 16] im Bereich Althengstett, aufgrund der tiefgründigen Verwitterung und der mächtigen Deckschichten im diesem Bereich ist diese geotechnisch für den Streckenbau nicht relevant. Eine letzte Störung, die Heumadener Verwerfung folgt dem Tal des Ziegelbachs bei Heumaden und wird nach der geologischen Karte [U 16] von der Strecke kurz vor dem Tunnel Hirsau zweimal gequert.

Tunnel Forst: Unter Berücksichtigung der vorliegenden Unterlagen lassen sich nach [U 1] und [U 4] für den Tunnel Forst die verschiedenen Trennflächenscharen der in Tabelle 2.3-1 zusammengefassten Eigenschaften angeben.

| Trennfläche [-] | Mittlere Orientierung [α/β] | Trennflächen- ausbildung [-] | Trennflächen- abstand* [m] | Ebene Durchtrennung* [-] |
|--------------------|--|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Kluftschar K1 | 020/79 | (un)eben bis wellig, rau | 0,2 – 5,0 (0,8) | 0,3 – 0,7 (0,5) |
| Kluftschar K2 | 115/87 | (un)eben bis wellig, rau | 0,2 – 5,0 (0,8) | 0,3 – 0,7 (0,5) |

* Mittelwerte in Klammern, für den Lösungsvorgang sind die maximalen Trennflächenabstände anzusetzen (mechanisch wirksam)

Tabelle 2.3-1: Eigenschaften der Trennflächenscharen



Tunnel Hirsau: Unter Berücksichtigung der vorliegenden Unterlagen lassen sich nach [U 3] und [U 5] für den Tunnel Hirsau die verschiedenen Trennflächenscharen der in Tabelle 2.3-2 zusammengefassten Eigenschaften angeben.

| Trennfläche [-] | Mittlere Orientierung [α/β] | Trennflächen- ausbildung [-] | Trennflächen- abstand* [m] | Ebene Durchtrennung* [-] |
|---------------------------|--|--|--|--|
| Kluftschar K1 | 251/83 233/90 | (un)eben bis wellig, rau | 0,3 – 0,7 (0,5) | 0,3 – 0,7 (0,5) |
| Kluftschar K2 | 165/85 340/85 | (un)eben bis wellig, rau | 0,3 – 0,7 (0,5) | 0,3 – 0,7 (0,5) |

* Mittelwerte in Klammern, für den Lösungsvorgang sind die maximalen Trennflächenabstände anzusetzen (mechanisch wirksam).

Tabelle 2.3-2: Eigenschaften der Trennflächenscharen

Das Baufeld liegt im Schwäbischen Schichtstufenland mit einem generellen Streichen der Schichten in ENE-WSW und einem sehr flachen Schichtfallen mit Winkeln von etwa 2° bis 3° in Richtung Südost [U 17]. Nach der Auswertung der Bohrlochscans und der Bohrkernansprache wurde in allen Bohrungen eine weitgehend söhlige Schichtlagerung angetroffen, die in Verbindung mit den Kluftflächen ein orthogonales Trennflächensystem bildet. Am stärksten treten in den Aufschlüssen die **Schichtflächen** hervor.

2.4 Grundwasserverhältnisse / Hydrogeologie

2.4.1 Allgemeines

Tunnel Forst: Hydrogeologisch bilden die anstehenden Schichten des Mittleren Muschelkalks eine Abfolge aus einem oberen Grundwasserleiter (Dolomite der Diemel-Fm. mit überlagernden Oberen Muschelkalk), einem Grundwassergeringleiter (ausgelaugte Heilbronn-Fm.) und einem weiteren Grundwasserleiter (Dolomite der Karlstadt-Fm.). Die Basis der Grundwasserleiter befindet sich jeweils an der Basis der Formationen.

Der Tunnel Forst quert die ca. 30 - 50 m breite Grabenbruchstruktur des Hengstetter Keupergrabens. In diesem schmalen von Nordwesten nach Südosten verlaufenden Graben sind in der Grabenscholle



die Schichten des Unterkeupers oberflächlich aufgeschlossen, der Versatz an den Grabenrandverwerfungen beträgt ca. 35 - 50 m. Die im Tunnel gefassten ergiebigen Quellen stehen mit den Störungszonen in direktem Zusammenhang.

Lokaler Vorfluter ist der nach Osten in die Würm entwässernde Altbach, an den die streckenparallel verlaufende Bahntwässerung anschließt. Das Projektgebiet liegt in keinem Wasserschutzgebiet, es befindet sich auch kein Wasserschutzgebiet im unmittelbaren Abstrombereich.

Hydrogeologisch wirkt der Tunnel Forst zusammen mit dem bis 1872 künstlich erstellten östlichen Voreinschnitt drainierend auf die Grund- und Schichtwasserkörper im Mittleren Muschelkalk. Die Schichtlagerungsverhältnisse führen zu einer natürlichen Grundwasserfließrichtung in südliche Richtung. Die bahn-parallelen Entwässerungsgräben wirken als Vorfluter. Der Tunnel Forst und die Voreinschnitte trennen hydrogeologisch einen ca. 6 - 7 km² großen, bis ca. 580 m hohen überwiegend bewaldeten Höhenzug nördlich vom stratigraphisch gleich aufgebauten Gebiet südlich der Bahn.

Das Grundwasser aus der Karlstadt-Formation ist in [U 1] wasserchemisch analysiert. Die Ergebnisse der Wasseranalysen auf Betonaggressivität des Grundwassers ergeben eine Einstufung als nicht aggressiv auf Beton nach DIN 4030. Die Beurteilung auf die Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe ergibt eine sehr geringe Stahlaggressivität nach DIN 50 929.

Tunnel Hirsau: Die Gebirgsdurchlässigkeit wird in den Untersuchungsabschnitten des Buntsandsteines weitgehend von der Durchtrennung der Trennflächen bzw. in erster Linie von den Klüften bestimmt. Die Gesteinsdurchlässigkeit ist demgegenüber vernachlässigbar gering.

Lokaler Vorfluter ist die im Norden in die Nagold entwässernde Bahntwässerung. Der geschlossene Bergwasserspiegel liegt im Bereich des Buntsandsteines vermutlich auf Höhe der Nagold und somit deutlich unterhalb der Trasse der Hermann-Hesse-Bahn. Es ist somit im Tunnel lediglich mit Schicht- und Sickerwasser zu rechnen.

Das aus dem mittleren Buntsandstein austretende Wasser ist nach [U 3], [U 6] und [U 7] als nicht betonangreifend (XA0) bis schwach betonangreifend (XA1) einzustufen. Ca. 700 m südlich des südlichen Tunnelportals des Tunnel Hirsau befindet sich eine tektonische Störung mit Schwerspatgang. Grundwasser, das mit dem Schwerspat in Kontakt kommt, kann erhöhte Sulfatgehalte aufweisen. In



diesem Bereich wurde nach [U 6] und [U 7] im Grundwasser Gehalte von Kohlendioxid bzw. Sulfat nachgewiesen. Möglicherweise ist im Bereich des Tunnel Hirsau das Grundwasser als XA1 einzustufen.

2.5 Geotechnische Besonderheiten

Nach DIN EN 1998-1/NA liegt das Projektgebiet in der **Erdbebenzone 1** und der Untergrundklasse R (Gebiete mit felsartigem Untergrund). Die Tunnel Forst und Hirsau sind in die Baugrundklasse A (unverwitterte (bergfrische) Festgesteine) einzugruppieren.

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im **Frosteinwirkungsgebiet I und II** (Ril 836.4101 A04) bzw. **Frosteinwirkungszone I und II** nach RStO 12 (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen). Die Grenze liegt am Rand des Nagoldtals bei Calw-Heumaden. Aufgrund der oberflächennahen frostempfindlichen Böden sollte auf eine frostsichere Mindestgründungstiefe von 1,0 m geachtet werden.

Im Bereich des **Tunnel Forst** befinden sich nach [U 14] die folgenden Schutzgebiete: Nördlich des Tunnels, oberhalb der L183 gelegen, befindet sich das **Naturschutzgebiet** (Nr.: 2.226) "Würm-Heckengäu". Der östliche Einschnitt des Tunnel Forsts sowie der Tunnel Forst liegen im Landschaftsschutzgebiet "Würm-Heckengäu" (Nr. 2.35.054). Der gesamte Tunnel Forst befindet sich im **Naturpark** (Nr. 7) Schwarzwald Mitte/Nord. Die Gehölze der Böschung rechts der Bahn sind Biotope der Offenlandkartierung (Nr. 172182350803) "Feldgehölze zwischen L 183 und Bahnlinie W Ostelsheim" kartiert, ein ca. 80 m langer Gewässerbereich westlich der L 183 ein Biotop (Nr. 172182350805) "Bach (I) W Ostelsheim". Im Bereich des westlichen Voreinschnitts des Tunnels befindet sich das Biotop „Gehölze an der ehemaligen Bahnlinie Althengstett“ (Nr. 172182350186).

Der **Tunnel Hirsau** liegt im **Naturpark Schwarzwald Mitte/Nord** (Nr. 7). Am südlichen Tunnelportal befinden sich 2 **Waldbiotope** „Felsen am Eisenbahntunnel Gutleutberg O Calw“ (Nr. 272182355809) und „Wald beim Grüner Weg O Calw“ (Nr. 272182354131). **Landschafts- oder Naturschutzgebiete, FFH- oder Vogelschutzgebiete** sind nach [U 14] nicht betroffen

Nach den vorliegenden Karten liegen beide Tunnel nicht in einem **Wasserschutzgebiet**.



Weiterhin wurden im Untersuchungsbereich verschiedene national geschützte Reptilien- und Amphibienarten nachgewiesen. Die Tunnel Forst und Hirsau dienen verschiedenen geschützten Fleckermausarten als Quartier.

3. ERGEBNISSE DER BODEN- UND FELSMECHANISCHEN VERSUCHE

Zur Ermittlung der boden- und felsmechanischen Eigenschaften wurden an Proben aus den Bohrkernen boden- und felsmechanische Laborversuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 5 und 6 zusammengestellt und ausgewertet.

3.1 Bodenmechanische Versuche

Aus den in den Tunneln Forst und Hirsau durchgeführten Kernbohrungen wurden Proben für die Bestimmung des Wassergehalts genommen. Insgesamt wurden an 30 Proben der Wassergehalt bestimmt (siehe Tabelle 3.1-1). Die Proben wurden aus dem Tunnelgewölbe (Schicht 1d), der Hinterpackung (1e), dem vollständig bis zersetzten Muschelkalk (Schicht 5a), dem frischen, unverwitterten Muschelkalk (Schicht 5b) und dem Buntsandstein der Schicht 8b entnommen.

| Schicht-Nr. | Gestein | Anzahl Proben | Wassergehalt | | |
|-------------|------------------------------|---------------|-----------------|-------|------------|
| | | | von | bis | Mittelwert |
| [-] | [-] | [-] | [%] | [%] | [%] |
| 1d | Tunnelgewölbe | 3 | 1,42 | 4,78 | 3,26 |
| 1e | Hinterpackung | 4 | 0,24 | 3,62 | 2,38 |
| 5a | Dolomit- / Kalkstein (W4-W5) | 3 | 13,08 | 16,44 | 14,87 |
| 5b | Dolomit- / Kalkstein (W0-W3) | 13 | 0,22 (0,09)* | 2,46 | 1,42 |
| 8b | Sandstein | 7 | 1,04 | 3,87 | 1,97 |

* Ausreißer; wurde bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

Tabelle 3.1-1: Ergebnisse der Wassergehalte



An den Felsgesteinen der Schichten 1d, 1e, 5b und 8b konnten geringe bis sehr geringe Wassergehalte von im Durchschnitt 1,42% bis max. 3,26% ermittelt werden. Im vollständig verwitterten bis zersetzten Muschelkalk der Schicht 5a wurde ein Wassergehalt von ca. 15% festgestellt.

3.2 Felsmechanische Versuche

Zur Erkundung des umgebenden Gesteins wurden an Kernstücken der ausgeführten Kernbohrungen einaxiale Druckversuche und Punktlastversuche durchgeführt. In der **Tabelle 3.2-1** sind die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche aufgeschlüsselt nach geologischer Schicht dargestellt.

| Schicht-Nr. | Gestein | Anzahl Proben | Einaxiale Druckfestigkeit | | |
|-------------|------------------------------|---------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | von | bis | Mittelwert |
| [-] | [-] | [-] | [MN/m ²] | [MN/m ²] | [MN/m ²] |
| 1d | Tunnelgewölbe | 1 | 20,2 | 20,2 | 20,2 |
| 5b | Dolomit- / Kalkstein (W0-W3) | 9 | 22,9 | 67,6 | 44,59 |
| 8b | Sandstein | 7 | 17,8 | 75,3 | 38,96 |

* Ausreißer; wurde bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

Tabelle 3.2-1: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Das Tunnelgewölbe (Schicht 1d) bestehend aus Bundsandsteinquadern weist eine einaxiale Druckfestigkeit von 20,2 MN/m² auf. Gemäß [U 5] schwanken die einaxialen Druckfestigkeiten zwischen 26,2 MN/m² und 40,8 MN/m². Im Tunnel Forst beträgt die mittlere einaxiale Druckfestigkeit 34,6 MN/m² ([U 5]). Im Tunnel Hirsau liegt die mittlere einaxiale Druckfestigkeit bei 37,6 MN/m² ([U 5]).

Die Dolomit- und Kalksteine der Schicht 5b besitzen eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 44,59 MN/m² auf. Für die Sandsteine des mittleren Bundsandsteins (Schicht 8b) wurde eine mittlere Druckfestigkeit von 38,96 MN/m² ermittelt.

In der nachfolgenden Tabelle 3.2-2 sind die Ergebnisse der Punktlastversuche nach Hudson aufgeschlüsselt nach geologischer Schicht dargestellt.



| Schicht-Nr. | Gestein | Anzahl Proben | Einaxiale Druckfestigkeit nach Hudson | | |
|-------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | von | bis | Mittelwert |
| [-] | [-] | [-] | [MN/m ²] | [MN/m ²] | [MN/m ²] |
| 1d | Tunnelgewölbe | 3 | 13,39 | 27,90 | 19,35 |
| 1e | Hinterpackung | 4 | 21,04 | 41,78 (108,72)* | 34,83 |
| 5b | Dolomit- / Kalkstein (W0-W3) | 14 | 18,00 (3,26)* | 122,08 | 65,01 |
| 8b | Sandstein | 8 | 22,32 | 63,40 | 34,83 |

* Ausreißer; wurde bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

Tabelle 3.2-2: Ergebnisse der Punktlastversuche nach Hudson

Für das Tunnelgewölbe (Schicht 1d) konnte eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 19,4 MN/m² ermittelt werden. Die Hinterpackung des Tunnelgewölbes (Schicht 1e) weist eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 34,8 MN/m² auf. Die Dolomit- und Kalksteine der Schicht 5b besitzen eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 65,0 MN/m² auf. Für die Sandsteine des mittleren Bundsandsteins (Schicht 8b) wurde eine mittlere Druckfestigkeit von 34,8 MN/m² ermittelt.

Ein Vergleich der Punktlastversuche mit den Einaxialen Druckversuchen von den jeweiligen Schichten ergibt für die Schicht 1d vergleichbare Werte. Für die Schicht 1e ist kein Vergleich möglich. Die Mittelwerte von Punktlastversuch und Einaxialem Druckversuch variieren bei der Schicht 5b um ca. 20 MN/m². Bei der Schicht 8b sind die Ergebnisse von Punktlastversuch und Einaxialem Druckversuch annähernd gleich. Grundsätzlich sind die Ergebnisse der durchgeführten einaxialen Druckversuche aufgrund des größeren Probenvolumens und der direkten, versuchstechnischen Bestimmung als zuverlässiger zu betrachten.



4. TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN UND KENNWERTE

4.1 Klassifizierung für bautechnische Zwecke

Nach den Erkundungsergebnissen sowie den Kenntnissen u.a. aus Archivunterlagen lassen sich die im Projektgebiet zu erwartenden Böden wie folgt geotechnisch klassifizieren.

| Schicht-Nr. | Kurzzeichen | Bezeichnung | Klassifizierung nach DIN | | | Frostempfindlichkeit ²⁾ | Verdichtbarkeit ³⁾ |
|-------------|-------------|---|---|--------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------|
| | | | 18 196 | 18 300 ¹⁾ | 18 301 ¹⁾ | | |
| 1b | - | Auffüllung (gemischtkörnig) | GW, GU, GU*, TL, UL | 3 - 5 (6 - 7) ⁴⁾ | BN 1 - BN 2, BS 1 - BS 4 | F2 - F3 | V1 - V3 |
| 1d | - | Tunnelgewölbe | Werkstein | - | FV 5 - FV 6 | - | - |
| 1e | - | Hinterpackung | GW, SW | 3 | - | F1 | V1 |
| 5a | m4, mmK | Karlstadt-Fm. (Mittlerer Muschelkalk), stark verwittert bis zersetzt | GU, GU*, (Dst), Dst | 6 - 7 | BN 1 - BN 2, BS 1 - BS 4, FV 2 - FV 6, FD 1 - FD 3 | F2 - F3 | V2 - V3 |
| 5b | m4, mmK | Karlstadt-Fm. (Mittlerer Muschelkalk), frisch (unverwittert) bis mäßig verwittert | Dst, Mst ⁵⁾ | 7 | FV 2 - FV 6 FD 2 - FD 3 | Fels | Fels |
| 8a | soP/sm/sVs | Sandsteine des Oberen und Mittleren Buntsandsteins, stark verwittert bis zersetzt | GU*, GU, GT*, SU*, SU, GW, ((Sst)), ((Tst)), (Sst), (Tst) ⁵⁾ | 4 - 6 | BN 1 - BN 2, BS 1 - BS 4, FV 2 - FV 3, FD 1 - FD 3 | F1 - F3 | V1 - V2 |



| Schicht-Nr. | Kurzzeichen | Bezeichnung | Klassifizierung nach DIN | | | Frostempfindlichkeit ²⁾ | Verdichtbarkeit ³⁾ |
|-------------|-------------|---|---|---------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | | | 18 196 | 18 300 ¹⁾ | 18 301 ¹⁾ | | |
| 8b | soP/sm/sVs | Sandsteine des Oberen und Mittleren Buntsandsteins frisch (unverwittert) bis mäßig verwittert | Sst, Tst ⁵⁾ | 6 - 7 | FV 5 - FV 6, FD 2 - FD 3 | Fels | Fels |
| 9 | kuE/kmGr | Lettenkeuper und Gipskeuper, verwittert, ausgelaugt | ((Tst, Mst, Dst)), (Tst, Mst, Dst) ⁵⁾ GU*, UL, TL, TM | 5, 6 (2) ⁷⁾ | BB 2 - BB4, BS 1 - BS 4, FV 1 | F3 | V2 - V3 |

1) gemäß DIN 18 3xx:2012-09

2) Nach ZTV E-StB 17, Tab. 3 (F1 nicht frostempfindlich, F3 sehr frostempfindlich).

3) V1 = verdichtbar, V2 = eingeschränkt verdichtbar V3 = schwer verdichtbar.

4) Der angegebene Boden kann bei Wassersättigung infolge Störung der Lagerung in eine fließende Bodenart übergehen

5) Bodenklasse 6 und 7 bei entsprechendem Steinanteil und Schutt

6) Bezeichnung nach DIN 4023

Tabelle 4.1-1: Bodenklassifizierung

Die Angabe der Boden- und Felsklassen der Tabelle 4.1-1 nach der zurückgezogenen DIN 18 3xx (Ausgabe 2012) erfolgt informativ. Seit 2015 ist Boden und Fels in Homogenbereiche einzuteilen. Bei der Festlegung der Homogenbereiche sind einsetzbare Bauverfahren und Baugeräte zu berücksichtigen. Eine vorläufige Einteilung in Homogenbereiche wird in Kap. 4.4 Homogenbereiche vorgenommen.

4.2 Bodenkennwerte

Gemäß DIN EN 1997-1 (Eurocode 7) ist der charakteristische Wert einer geotechnischen Kenngröße als „eine vorsichtige Schätzung desjenigen Wertes festzulegen, der im Grenzzustand wirkt.“ Unter Berücksichtigung dieser Definition lassen sich auf Basis der Untersuchungen, der durchgeführten Erkundungen, Versuchen und Ergebnissen der Vorerkundungen und von umfangreichen Erfahrungen mit den im Projektgebiet anstehenden Böden die in Tabelle 4.2-1 zusammengestellten charakteristischen Bodenkennwerte angeben. Lokale Abweichungen sind möglich.



| Schicht Nr. | Bezeichnung | Wichte feuchter Boden | Wichte unter Auftrieb | Reibungswinkel | Kohäsion | Undrainierte Kohäsion | Steifemodul |
|-------------|--|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| | | γ_k [kN/m ³] | γ_k' [kN/m ³] | φ_k' [°] | c_k' [kN/m ²] | $c_{u,k}$ [kN/m ²] | $E_{s,k}^{1)}$ [MN/m ²] |
| 1b | Auffüllung (gemischtkörnig) | 18 - 19 | 10 | 25 - 30 | 2 | 5 - 10 | 5 - 15 |
| 5a | Karlstadt-Fm., verwittert | 22,5 | 12,5 | 25 | 10 | 35 | 10 - 300 |
| 8a | Sandsteine des Mittl. Buntsandsteins, verwittert | 25,5 | 15,5 | 30 | 5 | 10 - 50 ²⁾ | 50-150 |

1) Ermittlung des Steifemoduls $E_{s,k}$ für den Laststeigerungsbereich 0 bis 250 kN/m²

2) maximale und minimale anzusetzende Werte, je nach Verwitterung, Einzelwerte ggf. höher.

Tabelle 4.2-1: Charakteristische Bodenkennwerte

4.3 Felsmechanische Kennwerte

Für das im Baufeld anstehende Festgestein lassen sich die folgenden charakteristischen Kennwerte angeben. Die charakteristischen Kennwerte für die Schicht 9 beruhen auf umfangreichen Erfahrungen mit den anstehenden Böden des Gipskeupers. Lokale Abweichungen sind möglich.



| Schicht-Nr. | Felsart / Abkürzung | Wichte feuchtes Gebirge γ_k [kN/m ³] | Reibungswinkel φ_k' [°] | Kohäsion ¹⁾ c_k' [kN/m ²] | Einax. Druckfestigkeit Gestein $\sigma_{c,k}$ [MN/m ²] | E-Modul Gebirge ²⁾ E_k [MN/m ²] |
|-------------|---|---|---------------------------------|--|--|--|
| 5b | Dst (mmK) | 26,5 | 27,5 | ≥ 0 | 20 – 120 (35) ²⁾ | 1.000 - 5.000 |
| 8b | Sst (soP, sVs, sm) | 26,5 | 35 | ≥ 0 | 15 – 80 (30) ²⁾ | 1.000 - 5.000 |
| 9 | kuE/kmGr stark bis schwach verwittert, ausgelaugt | 24 | 25 | ≥ 0 | 5-15 | 300 |

1) für Scherbeanspruchung auf Trennflächen

2) Werte gelten für Scherbeanspruchung entlang von Trennflächen in Abhängigkeit von der Durchtrennung.

3) Mittelwerte in Klammern

Tabelle 4.3-1: Charakteristische felsmechanische Kennwerte

Die Spannen für die einzelnen Kennwerte spiegeln die Ergebnisse der Labor- und Feldversuche wider. Die Verformungsmodul des Gebirges liegen in einer Größenordnung von etwa 2/3 der Elastizitätsmodul.

| Schicht Nr. | Felsart / Abkürzung | Schichtung | | Klüftung | |
|-------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | | $\varphi'_{k,s}$ [°] | $c'_{k,s}$ [MN/m ²] | $\varphi'_{k,k}$ [°] | $c'_{k,k}$ [MN/m ²] |
| 5b | Dst (mmK) | 27,5 (25) | 0 (0) | 27,5 (25) | 0,2 (0,1) |
| 8b | Sst (soP, sVs, sm) | 30 (25) | 0 (0) | 30 (25) | 0,05 (0) |

Tabelle 4.3-2: Charakteristische Trennflächenkennwerte; die Werte gelten für angewittertes bis frisches Gebirge, sofern nicht anders angegeben. Die unteren Kennwerte sind in Klammern angegeben.



4.4 Homogenbereiche

4.4.1 Allgemeines

Boden und Fels ist gemäß den Normen der VOB/C (seit der Ausgabe 2015) in Homogenbereiche einzuteilen, die für die Ausschreibung verwendet werden sollen. Ein Homogenbereich ist dabei ein begrenzter Bereich, bestehend aus einzelnen oder mehreren Boden- oder Felsschichten, der für die in den einzelnen Gewerken einsetzbaren Baugeräte vergleichbare Eigenschaften aufweist. Die Homogenbereiche sind somit ggf. gewerkespezifisch festzulegen und hängen von den einsetzbaren Baugeräten ab. Da die geplanten Bauverfahren zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung noch nicht festgelegt waren, erfolgt eine vorläufige Einteilung auf Basis der empfohlenen Verfahren gemäß Kap. 5, die im Zuge des Planungsprozesses bis zur Ausschreibung zu überprüfen und ggf. zu überarbeiten ist.

Umweltrelevante Inhaltsstoffe wurden bei der Einteilung der Homogenbereiche nur dann berücksichtigt, wenn Sie eine offensichtliche Auswirkung auf das Bauverfahren/Baugerät haben oder den Aufwand beim Arbeiten mit diesen Stoffen beeinflussen. Dies wurde immer dann unterstellt, wenn es sich um gefährlichen Abfall nach der AVV handelt. Sofern eine umwelttechnische Belastung sich im Wesentlichen nur auf die Entsorgungskosten auswirkt, wurde keine Unterteilung in den Homogenbereichen ausgewiesen. Es wird empfohlen, die Entsorgung in solchen Fällen über eigene Positionen in der Ausschreibung zu regeln.

Die Homogenbereiche und die angegebenen Eigenschaften beschreiben den Zustand des Bodens und Fels vor dem Lösen. Bei den aufgeführten Eigenschaften und Kennwerten handelt es sich nicht um charakteristische Kennwerte für Berechnungen, sondern um mögliche Spannbreiten, die zur Abschätzung der Bearbeitbarkeit von Boden und Fels verwendet werden können.

Die Einteilung der Homogenbereiche ist zur Ausschreibung unter Berücksichtigung der geplanten Bauverfahren vom Planer und geotechnischen Gutachter zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Bauzeitliche Überprüfungen sind mit Versuche nach den in der Tabelle 4.4-1 aufgeführten Prüfverfahren durchzuführen.



| Eigenschaft / Kennwert | | Prüfung/Prüfvorschrift |
|------------------------|--|---|
| Bodenmechanik | Korngrößenverteilung | DIN EN ISO 17 892-4 |
| | Massenanteil Steine, Blöcke, große Blöcke | Aussortieren, Vermessen, Wiegen |
| | Mineralogische Zusammensetzung der Steine und Blöcke | DIN EN ISO 14 689-1 |
| | natürliche Dichte | DIN EN ISO 17 892-2 |
| | undrainierte Scherfestigkeit c_u | DIN 4094-4 |
| | Kohäsion c' | DIN EN ISO 17 892-10 |
| | Sensitivität c_{fv}/c_{rv} | DIN 4094-4 |
| | Wassergehalt w_n | DIN EN ISO 17 892-1 |
| | Plastizität I_p | DIN EN ISO 17 892-12 |
| | Konsistenz I_c | DIN EN ISO 17 892-12 |
| | bezogene Lagerungsdichte I_D | DIN 18 126 in Verbindung mit Dichtebe- stimmung nach DIN EN ISO 17 892-2 |
| | Bodengruppe | DIN 18 196 |
| | Abrasivität | LCPC-Test nach NF P18-579 |
| Felsmechanik | Dichte | DIN EN ISO 17 892-2 |
| | Verwitterung und Veränderungen/Ver- änderlichkeit | DIN EN ISO 14 689-1 |
| | einaxiale Druckfestigkeit | DIN 18 141-1 |
| | Trennflächenrichtung, Trennflächenab- stand, Gesteinskörperform | DIN EN ISO 14 689-1 |
| | Abrasivität | CAI-Test nach NF P 94-430-1 |

Tabelle 4.4-1: Für eine Überprüfung der Eigenschaften und Kennwerte der Homogenbereiche anzuwendende Prüfverfahren

4.4.2 DIN 18 300 Erdarbeiten

Für die Festlegung der Homogenbereiche für Erdarbeiten (DIN 18 300) wird davon ausgegangen, dass der Aushub mit einem Mini- oder Kompaktbagger (< 10 to) ausgeführt wird, der Boden zumindest zum Teil auf der Baustelle zwischengelagert wird und vor Ort wieder eingebaut und verdichtet wird. Daher berücksichtigen die Homogenbereiche sowohl das Lösen als auch den Wiedereinbau und die Verdichtung. Sollte ein Wiedereinbau nicht vorgesehen sein, können die Homogenbereiche



weiter zusammengefasst werden. In der nachfolgenden Tabelle 4.4-2 und der Tabelle 4.4-3 ist die Zuordnung der in diesem Gutachten angegebenen geologischen Schichten zu Homogenbereichen für Erdarbeiten, sowie die zusammengefassten Eigenschaften der Homogenbereiche angegeben. Es wird davon ausgegangen, dass der Aushub maximal bis in eine Tiefe von 1 m u. SO erfolgt, sodass nur bis in diese Tiefe Homogenbereiche für Erdarbeiten ausgewiesen werden.

| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche |
|---|--|
| | Erd-A |
| Schicht Nr. | 1b, 5a, 8a |
| ortsübliche Bezeichnung | Auffüllung Karlstadt-Formation, stark verwittert bis zersetzt Buntsandstein, stark verwittert bis zersetzt |
| Korngrößenverteilung mit Korngrößenband ²⁾ | UL, UM, UA, TL, TM, TA, SE, SW, SU, SU*, ST, ST*, GW, GU, GU*, GT, GT* |
| Massenanteil Steine [%] Blöcke [%] große Blöcke [%] | < 40 < 20 < 10 |
| natürliche Dichte [g/cm ³] | 1,5 - 2,3 |
| undrainierte Scherfestigkeit c _u [kN/m ²] | 0 - 60 |
| Wassergehalt w _n [%] | 5 - 40 |
| Plastizitätszahl I _P | <0,35 – 0,55 / leicht bis ausgeprägt plastisch |
| Konsistenzzahl I _C / Bezeichnung ¹⁾ | 0,1 - >1,0 / weich - halbfest |
| bezogene Lagerungsdichte I _D / Bezeichnung ¹⁾ | 0,3 – 0,8 / locker - dicht |
| organischer Anteil v _{gl} / Bezeichnung ¹⁾ | < 5 % / nicht bis schwach organisch |
| Bodengruppe | TA, TM, TL, UA, UM, UL, UM, SU, SU*, ST, ST*, GT, GU, GU*, A |

1) Begriffe nach DIN EN ISO 14 688-2

2) Das Körnungsband bezieht sich nur auf den Massenanteil ohne Stein, Blöcke und Große Blöcke

Tabelle 4.4-2: Homogenbereiche gemäß DIN 18 300 für Erdarbeiten in Boden



| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche |
|---|--|
| | Erd-B |
| Schicht Nr. | 1e, 5b, 8b, 9 |
| ortsübliche Bezeichnung | Hinterpackung Tunnelgewölbe Mittlerer Muschelkalk, Buntsandstein, frisch bis mäßig verwittert Lettenkeuper/Gipskeuper, angewittert |
| Benennung von Fels | Mst, Dst, Kst, Tst, Ust, Sst |
| Dichte [g/cm ³] | 2,0 - 2,6 |
| Verwitterung und Veränderungen, Veränderlichkeit | frisch - verfärbt nicht veränderlich bis veränderlich |
| einaxiale Druckfestigkeit [MN/m ²] | 10 - 150 |
| Trennflächenrichtung, Trennflächenabstand, Gesteinskörperform | Fallrichtung: 0° - 360° Fallwinkel: 0° - 10° Trennflächenabstand: 10 mm - 1500 mm Gesteinskörper ¹⁾ : tafelförmig |

1) Bezeichnung nach DIN EN ISO 14 689-1

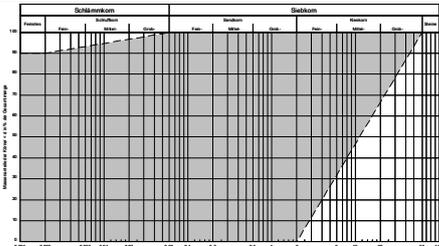
Tabelle 4.4-3: Homogenbereiche gemäß DIN 18 300 für Erdarbeiten im Festgestein

4.4.3 DIN 18 301 Bohrarbeiten

Für Bohrarbeiten für eine Pfahlgründung sowie eine Rückverankerung durch Felsnägel kann die Zuordnung der in diesem Gutachten angegebenen geologischen Schichten zu Homogenbereichen für Bohrarbeiten, sowie die zusammengefassten Eigenschaften der Homogenbereiche gemäß Tabelle 4.4-4 und Tabelle 4.4-5 verwendet werden. Es wird davon ausgegangen, dass die erforderlichen Bohrungen durch leistungsstarke Bohrraupen bzw. Lafettenbohrgeräte ausgeführt werden.

| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche |
|-------------------------|--|
| | Bohr-A |
| Schicht Nr. | 1b, 5a, 8a |
| ortsübliche Bezeichnung | Auffüllung Karlstadt-Formation, stark verwittert bis zersetzt Buntsandstein, stark verwittert bis zersetzt |



| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche | |
|--|--|--|
| | Bohr-A | |
| Korngrößenverteilung mit Korngrößenband ²⁾ |  <p>UL, UM, UA, TL, TM, TA, SE, SW, SU, SU*, ST, ST*, GW, GU, GU*, GT, GT*</p> | |
| Massenanteil Steine [%] | < 40 | |
| Blöcke [%] | < 20 | |
| große Blöcke [%] | < 10 | |
| Kohäsion c' [kN/m ²] | 0 - 50 | |
| undrainierte Scherfestigkeit c_u [kN/m ²] | 0 - 60 | |
| Wassergehalt w_n [%] | 5 - 40 | |
| Plastizitätszahl I_p | <0,35 – 0,55 / leicht bis ausgeprägt plastisch | |
| Konsistenzzahl I_c / Bezeichnung ¹⁾ | 0,1 - >1,0 / weich - halbfest | |
| bezogene Lagerungsdichte I_D / Bezeichnung ¹⁾ | 0,3 – 0,8 / locker - dicht | |
| LCPC-Abrasivitäts-Koeffizient LAK [g/to] / Bezeichnung ³⁾ | nicht abrasiv bis abrasiv | |
| Bodengruppe | TA, TM, TL, UA, UM, UL, UM, SU, SU*, ST, ST*, GT, GU, GU*, A | |

1) Begriffe nach DIN EN ISO 14 688-2

2) Das Körnungsband bezieht sich nur auf den Massenanteil ohne Stein, Blöcke und Große Blöcke

3) Begriffe gemäß Käsling, H. & Thuro, K.: Bestimmung der Gesteinsabrasivität - Versuchstechniken und Anwendung; in: DGGT, 31. Baugrundtagung, 2010

Tabelle 4.4-4: Homogenbereiche gemäß DIN 18 301 für Bohrarbeiten in Boden



| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche |
|---|---|
| | Bohr-B |
| Schicht Nr. | 1e, 5b, 8b, 9 |
| ortsübliche Bezeichnung | Hinterpackung Tunnelgewölbe Mittlerer Muschelkalk, Buntsandstein, frisch bis mäßig verwittert Lettenkeuper/Gipskeuper angewittert |
| Benennung von Fels | Mst, Dst, Kst, Tst, Ust, Sst |
| Verwitterung und Veränderungen, Veränderlichkeit | frisch - verfärbt nicht veränderlich bis veränderlich |
| einaxiale Druckfestigkeit [MN/m ²] | 10 - 150 |
| Trennflächenrichtung, Trennflächenabstand, Gesteinskörperform | Fallrichtung: 0° - 360° Fallwinkel: 0° - 10° Trennflächenabstand: 10 mm - 1500 mm Gesteinskörper ¹⁾ : tafelförmig |
| Cerchar-Abrasivitätsindex CAI [-] / Bezeichnung ²⁾ | nicht abrasiv - schwach abrasiv |

1) Bezeichnung nach DIN EN ISO 14 689-1

2) Begriffe gemäß Käsling, H. & Thuro, K.: Bestimmung der Gesteinsabrasivität - Versuchstechniken und Anwendung; in: DGGT, 31. Baugrundtagung, 2010

Tabelle 4.4-5: Homogenbereiche gemäß DIN 18 301 für Bohrarbeiten im Festgestein

4.4.4 DIN 18 312 Untertagebauarbeiten

Bei Untertagebauarbeiten wird in den frischen bis mäßig entfestigten Gesteinen von einem Ausbruch mit einem leistungsstarken Tunnelbagger bzw. im gesteinsfesten Fels von einem Bohrvortrieb ausgegangen. Daraus ergibt sich die nachfolgende Unterscheidung in 2 Homogenbereiche.

| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche |
|-------------------------|--|
| | Tunnel-A |
| Schicht Nr. | 1b, 5a, 8a |
| ortsübliche Bezeichnung | Auffüllung Karlstadt-Formation, stark verwittert bis zersetzt Buntsandstein, stark verwittert bis zersetzt |



| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche |
|--|--|
| | Tunnel-A |
| Dichte [g/cm ³] | 1,5 - 2,3 |
| Verwitterung und Veränderungen, Veränderlichkeit ¹⁾ | stark verwittert bis zersetzt |
| Trennflächenrichtung, Trennflächenabstand, Gesteinskörperform | Fallrichtung: 0° - 360° Fallwinkel: 0° - 10° Trennflächenabstand: 10 mm - 1500 mm Gesteinskörper ¹⁾ : tafelförmig |
| Öffnungsweite und Kluftfüllung von Trennflächen ¹⁾ | Öffnungsweite: eng bis weit Kluftfüllung: keine bis bindig |
| Abrasivität CAI ²⁾ | schwach abrasiv – stark abrasiv |

¹⁾Begriffe nach DIN EN ISO 14 689-1

²⁾Bezogen auf einaxiale Druckversuche, bei Punktlastversuchen auch bis 200 MN/m²

Tabelle 4.4-6: Homogenbereiche gemäß DIN 18 312 für Untertagebauarbeiten im Boden

| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche |
|--|--|
| | Tunnel-B |
| Schicht Nr. | 1e, 5b, 8b, 9 |
| ortsübliche Bezeichnung | Hinterpackung Tunnelgewölbe Mittlerer Muschelkalk, Buntsandstein, frisch bis mäßig verwittert Lettenkeuper/Gipskeuper angewittert |
| Dichte [g/cm ³] | 2,0 - 2,6 |
| Verwitterung und Veränderungen, Veränderlichkeit ¹⁾ | frisch - verfärbt nicht veränderlich bis veränderlich |
| einaxiale Druckfestigkeit [MN/m ²] | 10 - 150 |
| Trennflächenrichtung, Trennflächenabstand, Gesteinskörperform | Fallrichtung: 0° - 360° Fallwinkel: 0° - 10° Trennflächenabstand: 10 mm - 1500 mm Gesteinskörper ¹⁾ : tafelförmig |



| Eigenschaft / Kennwert | Homogenbereiche |
|---|---|
| | Tunnel-B |
| Öffnungsweite und Kluftfüllung von Trennflächen ¹⁾ | Öffnungsweite: eng bis weit Kluftfüllung: keine bis bindig |
| Abrasivität CAI ²⁾ | schwach abrasiv – stark abrasiv |

¹⁾Begriffe nach DIN EN ISO 14 689-1

²⁾Bezogen auf einaxiale Druckversuche, bei Punktlastversuchen auch bis 200 MN/m²

Tabelle 4.4-7: Homogenbereiche gemäß DIN 18 312 für Untertagebauarbeiten im Festgestein

5. BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN ZUR BAUAUSFÜHRUNG

5.1 Rückverankerungen ins Gebirge

Im Zuge der Sanierung des aus dem Buntsandstein bestehenden Mauerwerk des Tunnelgewölbes kann eine Rückverankerung des Tunnelgewölbes zur Anwendung kommen. Einerseits können bei erforderlichem Ausbrechen von Mauerwerksteilen und Verringerung der Verbundwirkung umliegende Bereiche des Tunnelgewölbes insbesondere in überhängenden Bereichen gesichert werden. Andererseits können Ausbaubögen, die für Teilerneuerungen des Tunnelgewölbes nach dem Lamellenverfahren zur Ausführung kommen, durch Felsnägel ins Gebirge rückverankert werden.

Nach den Anforderungen der Lichtraumprofile der Bahn und den Anforderungen des Umweltschutzes für die Fledermaus-Bereiche werden die beiden Tunnel Forst und Hirsau durch eine Trennwand unterteilt. Im Bahntunnel wird ein Fluchtweg sowie eine mögliche spätere Elektrifizierung mit Stromschiene berücksichtigt und für die Fledermäuse wird der Luftraum durch die Verwendung von Gleis-tragplatten und der dadurch möglichen tieferen Gleislage optimiert.

Die Tunnelsohle wird auf das neue Niveau ausgehoben und die Fundamente für die Stützkonstruktion der Kammerwände werden hergestellt. Es sind Flachgründungen, auf denen die Stahlstützen mit Fußplatten aufgesetzt und befestigt werden. Die neuen Gleise werden auf Gleis-tragplatten verlegt, um durch die geringere Unterbaumächtigkeit mehr Höhe und damit mehr Gewölbe-fläche für die Fledermäuse zu gewinnen.



Die zweifach abknickenden Stahlstützen werden im Abstand von ca. 5,0 m aufgestellt und im oberen Bereich mit einer Horizontalabspannung seitlich durch die Tunnelwandung ins Gebirge abgestützt. Die Befestigung erfolgt mit horizontalen Mikropfählen, die ca. 6,0 m weit in die Tunnellaibung eingebohrt werden. Damit werden eventuell vorhandene Entwässerungsbereiche und sonstige Hohlräume hinter der Tunnelschale überbrückt. Die Verpressung der Mikropfähle, die doppelten Korrosionsschutz erhalten, erfolgt auf mindestens 2 m bis 3 m Länge im Fels.

Für eine Rückverankerung einer Bohrpfahlwand, einer Übernetzung oder von Raumgitterwänden durch verpresste Mikropfähle können in nachfolgender Tabelle 5.1-1 aufgeführte Werte für die charakteristische Mantelreibung angesetzt werden.

| Schicht | Bruchwert $q_{s,k}$ der Pfahlmantelreibung [kN/m ²] |
|--|---|
| Hinterfüllung des Tunnelgewölbes (Schicht 1e) | 0 ¹⁾ |
| Dolomitstein/Kalkstein, Karlstadt-Fm., entfestigt, zersetzt (Schicht 5a) | 80 |
| Dolomitstein/Kalkstein, Karlstadt-Fm., unverwittert (Schicht 5b) | 300 |
| Sandstein, Mittl. Bundsandstein, entfestigt, zersetzt (Schicht 8a) | 100 |
| Sandstein, Mittl. Bundsandstein, unverwittert (Schicht 8b) | 500 |

1) aufgrund der Heterogenität und der Gefahr von Hohlräumen in der Hinterfüllung

Tabelle 5.1-1: Charakteristische Pfahlmantelreibung für verpresste Mikropfähle

5.2 Flachgründung der Fundamente der Stützkonstruktion

5.2.1 Flachgründung in stark verwitterten Felsbereichen und in der Störungszone

Eine Gründung mittels Einzelfundamenten kann mit den Bemessungswerten des Sohlwiderstands in der folgenden Tabelle 5.2-1 geplant werden.



| kleinste Einbindetiefe des Fundaments [m] | Bemessungswert $\sigma_{R,d}$ des Sohlwiderstands [kN/m ²] b bzw. b' | | | |
|---|--|-------|-------|-------|
| | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | 2,0 m |
| 0,5 | 230 | 240 | 245 | 240 |
| 1,0 | 280 | 285 | 295 | 195 |

ACHTUNG – Die angegebenen Werte sind Bemessungswerte des Sohlwiderstands, keine aufnehmbaren Sohldrücke nach DIN 1054:2005-01 und keine zulässigen Bodenpressungen nach DIN 1054:1976-11

Tabelle 5.2-1: Bemessungswert des Sohlwiderstands für Streifenfundamente in Schicht 5a, 8a bzw. 9 auf Gründungspolster unter Berücksichtigung von Grundwasser

Die in der vorstehenden Tabelle angegebenen Bemessungswerte basieren auf überschlägigen Grundbruch- und Setzungsberechnungen unter Ansatz von zulässigen Setzungsbeträgen ≤ 2 cm und den bodenmechanischen Kennwerten entsprechend der Tabelle 4.2-1. Es wurde von einem Horizontallastanteil $H/V \leq 0,2$ und von max. 50 % veränderlichen Lasten, sowie einem zentrischen Lasteintrag ausgegangen.

Die Gründung ist in frostfreier Tiefe mindestens 1,0 m unter Geländeoberfläche vorzusehen.

Für die Sohlplatte auf dem wie oben beschrieben hergestellten Gründungsplanum kann für die statische Bemessung nach dem Bettungsmodulverfahren für **Vorentwurfszwecke** ein Bettungsmodul von $k_{s,k} = 15$ MN/m³ angesetzt werden. Der Bettungsmodul ist keine Bodenkonstante, sondern maßgeblich von der Größe der Lastfläche, der Belastung und der Laststellung abhängig. Daher stellt der angegebene Bettungsmodul lediglich einen Schätzwert dar und ist im Zuge der Planung anhand von Setzungsberechnungen zu überprüfen. Im Bereich der Plattenränder darf der Bettungsmodul auf einem Randstreifen von 2 m mit dem 3-fachen Wert angesetzt werden. Im Bereich eines konzentrierten Lasteintrags (Einzelstützen, innenliegende Wände) darf der doppelte Bettungsmodul angesetzt werden.

5.2.2 Flachgründung im Fels

Eine Gründung mittels Einzelfundamenten kann mit den Bemessungswerten des Sohlwiderstands in der folgenden Tabelle 5.2-2 geplant werden.



| kleinste Einbindetiefe des Fundaments [m] | Bemessungswert $\sigma_{R,d}$ des Sohlwiderstands [kN/m ²] b bzw. b' | | | |
|---|--|-------|-------|-------|
| | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | 2,0 m |
| 0,5 | 325 | 340 | 360 | 370 |
| 1,0 | 410 | 425 | 440 | 455 |

ACHTUNG – Die angegebenen Werte sind Bemessungswerte des Sohlwiderstands, keine aufnehmbaren Sohldrücke nach DIN 1054:2005-01 und keine zulässigen Bodenpressungen nach DIN 1054:1976-11

Tabelle 5.2-2: Bemessungswert des Sohlwiderstands für Streifenfundamente in Schicht 5b und 8b auf Gründungspolster unter Berücksichtigung von Grundwasser

Die in der vorstehenden Tabelle angegebenen Bemessungswerte basieren auf überschlägigen Grundbruch- und Setzungsberechnungen unter Ansatz von zulässigen Setzungsbeträgen ≤ 2 cm und den bodenmechanischen Kennwerten entsprechend der Tabelle 4.2-1. Es wurde von einem Horizontallastanteil $H/V \leq 0,2$ und von max. 50 % veränderlichen Lasten, sowie einem zentrischen Lasteintrag ausgegangen.

Die Gründung ist in frostfreier Tiefe mindestens 1,0 m unter Geländeoberfläche vorzusehen.

Für die Sohlplatte auf dem wie oben beschrieben hergestellten Gründungsplanum kann für die statische Bemessung nach dem Bettungsmodulverfahren für **Vorentwurfszwecke** ein Bettungsmodul von $k_{s,k} = 30$ MN/m³ angesetzt werden. Der Bettungsmodul ist keine Bodenkonstante, sondern maßgeblich von der Größe der Lastfläche, der Belastung und der Laststellung abhängig. Daher stellt der angegebene Bettungsmodul lediglich einen Schätzwert dar und ist im Zuge der Planung anhand von Setzungsberechnungen zu überprüfen. Im Bereich der Plattenränder darf der Bettungsmodul auf einem Randstreifen von 2 m mit dem 3-fachen Wert angesetzt werden. Im Bereich eines konzentrierten Lasteintrags (Einzelstützen, innenliegende Wände) darf der doppelte Bettungsmodul angesetzt werden.

5.3 Teilerneuerung des Tunnelgewölbes im Bereich der Störzone Tunnel Forst

Aufgrund der Ergebnisse aus den Schürfen sollte der Bereich, in dem das vorhandene Tunnelgewölbe durch Rippen aus Stahlbeton teilerneuert wird, nicht auf den Block 52 beschränkt bleiben,



sondern es sollte eine Teilerneuerung auf zwei anschließende Blöcke zu beiden Richtungen ausgedehnt werden. Durch ausreichende Querbewehrung zwischen den Rippen sollte dafür gesorgt werden, dass eine Lastumlagerung in Längsrichtung des Tunnels erfolgen kann, da hierdurch schwächere Baugrundbereiche unterhalb der Fundamente überbrückt werden können.

5.4 Grundwasserverhältnisse / Dränagemaßnahmen

Tunnel Forst: Im Zuge der Instandsetzung des Tunnels Forst sind Erneuerungen der Dränagemaßnahmen im bzw. durch das Tunnelgewölbe und die Wasserableitung in Ulmen- und Mittenentwässerungen so-wie Querverbindungen vorgesehen mit dem Ziel, einen störungsfreien Bahnbetrieb zu gewährleisten. Sämtliche Maßnahmen und Wasserableitungen für eine dauerhafte Entwässerung beinhalten auch vorlaufende Bauzustände. Grundsätzlich bleiben Einleitmengen gegenüber dem Ist-Zustand unverändert. Im Tunnel Forst befindet sich eine Wasserleitung DN 100, die das Wasser aus der Quelle bei ca. km 36,4+59 zum Pumpenhaus vor dem Ostportal leitet. Diese Wasserleitung ist im Zuge des Streckenbaus voraussichtlich bauzeitlich umzuleiten, soll aber dauerhaft erhalten bleiben.

Für den Tunnel Forst kann bei einer Drainage der Tunnelschale mit Absenkung des Grundwassers auf Höhe Tunnelsohle und Abführung von Sickerwasser nach [U 8] von einer dauerhaften Förderung von Grundwasser ausgegangen werden. Die geschätzten Wassermengen liegen für den Bereich km 36,3+73 – 37,0+68 zeitlich variierend zwischen 0 l/s bis 80 l/s. Zulaufende Wassermengen aus dem westlichen Voreinschnitt sind hierbei nicht berücksichtigt.

Für den Bereich km 36,3+73 – 36,4+59 kann beim Erhalt der vorhandenen Wasserleitung von der Quelfassung im Tunnel zum Pumpenhaus am Ostportal mit einer Fördermenge von 0 l/s bis 6 l/s eine Absenkung bis zur Tunnelsohle erreicht werden.

Insbesondere die tonigen Schichten der anstehenden Gesteine neigen in Verbindung mit Wassereinbrüchen und einer mechanischen / dynamischen Belastung (z.B. durch Fahrzeuge) zum Aufweichen / Verschlammern. Hierdurch kann es zu Behinderungen der Arbeit kommen. Die Standsicherheit von Einbauten kann ggf. gefährdet sein.



Tunnel Hirsau: Im Zuge der Instandsetzung des Tunnels Hirsau sind Erneuerungen der Drainage-maßnahmen im bzw. durch das Tunnelgewölbe und die Wasserableitung in Ulmen- und Mittenentwässerungen sowie Querverbindungen vorgesehen mit dem Ziel, einen störungsfreien Bahnbetrieb zu gewährleisten. Sämtliche Maßnahmen und Wasserableitungen für eine dauerhafte Entwässerung beinhalten auch vorlaufende Bauzustände. Grundsätzlich bleiben Einleitmengen gegenüber dem Ist-Zustand unverändert.

Für den Bereich km 43,0+70 – 44,3+24 im Tunnel Hirsau kann bei einer Drainage der Tunnelschale mit Abführung von Sickerwasser nach [U 8] mit einer Fördermenge bis zu 10 l/s eine Absenkung bis zur Tunnelsohle erreicht werden. Zulaufende Wassermengen aus dem südlichen Voreinschnitt sind hierbei nicht berücksichtigt.

Insbesondere die tonigen Schichten der anstehenden Gesteine neigen in Verbindung mit Wasser- einbrüchen und einer mechanischen / dynamischen Belastung (z.B. durch Fahrzeuge) zum Aufwei- chen / Verschlammern. Hierdurch kann es zu Behinderungen der Arbeit kommen. Die Standsicher- heit von Einbauten kann ggf. gefährdet sein.

6. SCHLUSSBEMERKUNG

Die Abtrennung von Bahnkammer und Fledermauskammer mittels Stahlkonstruktion in den Tunneln Forst und Hirsau der Hermann-Hesse-Bahn erfolgt mit einer flachgegründeten Stützkonstruktion der Kammerwänden. Die Stützkonstruktion wird mit Mikropfählen in dem umgebenden Gestein rückver- ankert. Der Tunnel Forst liegt vollständig in den verwitterten bis nicht verwitterten Kalk- und Dolo- mitsteinen des Mittleren Muschelkalks. Der Tunnel Hirsau wurde durch die verwitterten bis nicht verwitterten Sandsteine des Mittleren Bundsandstein aufgeföhren. Die Bohrlochkamerabeföhren zeigten i.d.R. ein ca. 0,7 m – 1,2 m mächtiges Tunnelgewölbe und anschließend bis zu 1 m Hinter- packung. Die Hinterpackung des Tunnelgewölbes bestand aus Beton, Ziegel und einer Teerabdich- tung, der Spalt zwischen dem Tunnelgewölbe und dem anstehenden Berg wurde bei Bau des Tun- nels mit Bruchstücken des Gesteins aufgefüllt und besitzt Hohlräume von 10 cm bis max. 100 cm Breite. Der feste Fels steht an manchen Stellen bis zu 2 m hinter dem Tunnelgewölbe an. Die Fels- kennwerte des umliegenden Gesteins können für die statischen Berechnungen erst ab dieser Bohr- tiefe angesetzt werden.



Die Erkundung der Bestandstunnel ist naturgemäß eine stichprobenartige Bestandsaufnahme, die zwischen den Aufschlüssen Ergebnisse interpoliert. Abweichungen in gewissem Umfang sind somit nicht gänzlich auszuschließen. Sollten geotechnische Fragen auftreten, die im vorliegenden Gutachten nicht bzw. nicht ausreichend behandelt wurden, oder sollten sich Abweichungen bzw. Abänderungen in den Planungen bzw. Annahmen ergeben, die diesem Gutachten zugrunde gelegt wurden, so ist die Dr. Spang GmbH vom Auftraggeber zu informieren und zu einer ergänzenden Stellungnahme aufzufordern.

Der anstehende Baugrund und die Gründungssohle ist gemäß Normenhandbuch EC 7-1, Abs. 4.3(1)P durch uns zu kontrollieren und abzunehmen. Bei Abweichung der Bodenverhältnisse von den in diesem Bericht beschriebenen Verhältnissen sind wir umgehend zu verständigen.

Darüber hinaus ist eine Kontrolle der Baudurchführung gemäß EC 7, Teil 1, Abs. 4.4 vorzunehmen. Die Eignung der vorgesehenen Erdbaustoffe muss vor Beginn der Bauausführung nachgewiesen werden. Während der Bauausführung müssen die Erdarbeiten überwacht und Verdichtungskontrollen in Form einer Eigenüberwachung und durch Kontrollprüfungen vorgenommen werden.

Zur Beantwortung weiterer Fragen stehen wir Ihnen gerne jederzeit zur Verfügung.

i.V.

Dr.-Ing. Axel Möllmann
(Projektleiter)

i.A.

Silke Herzog, M.Sc.
(Projektgeologin)

- Verteiler:**
- Zweckverband Hermann-Hesse-Bahn, Hr. Schwolow, Calw, 1 x per Mail an <holger.schwolow@kreis-calw.de>
 - Dr. Spang GmbH, Esslingen, 1 x