



Anspruchsvoller NÖT-Tunnelbau in heterogenem, hydrothermal überprägtem Buntsandstein für die Ortsumfahrung Bad Bergzabern

Dr. Ralf J. Plinninger, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried
M.Sc. Pafos Busch, BEMO Tunnelling GmbH, Eching

Der Kurort Bad Bergzabern liegt im Südwesten Deutschlands, etwa 40 km nordwestlich der Stadt Karlsruhe. Kernelemente der in Bau befindlichen Ortsumfahrung sind der Neubau eines rd. 1,5 km langen Straßentunnels und eines parallel verlaufenden Rettungsstollens. Diese wurden in den Jahren 2021 - 2023 in konventioneller bergmännischer Bauweise nach den Prinzipien der NÖT vorgetrieben. Geologisch ist das Projekt durch eine Abfolge triassischer Sand- und untergeordnet Ton-Schluffsteine aus dem Buntsandstein gekennzeichnet. Bei der Öffnung des nahegelegenen Oberrheingrabens wurden diese Gesteine durch zahlreiche Verwerfungen verstellt, gegeneinander versetzt und durch migrierende hydrothermale Lösungen überprägt. Rezente Verwitterungsvorgänge trugen zu einer zusätzlichen Veränderung bei und bilden ein in Summe äußerst heterogenes Gebirge, das eine kleinräumige und intensive Variation von Verwitterungsgrad, Gesteinsfestigkeit und Trennflächengefüge aufwies. Der Beitrag gibt einen Überblick über dieses anspruchsvolle Projekt, das mit einer großen Bandbreite unterschiedlicher Untergrundbedingungen aufwarten konnte. Die Erfahrungen zeigen dabei die Vorteile des konventionellen NÖT-Vortriebs, auf unterschiedliche geologische Herausforderungen flexibel reagieren zu können.

1 Einleitung

Das Projekt Ortsumfahrung Bad Bergzabern befindet sich in der Nähe der gleichnamigen Kurstadt in Rheinland-Pfalz. Bad Bergzabern, ein Mittelzentrum mit rd. 8800 Einwohnern, liegt etwa 5,5 Kilometer nordöstlich der französischen Grenze und etwa 40 Kilometer nordwestlich von Karlsruhe. Morphologisch ist das Projektareal am östlichen Rand des Pfälzerwalds - einem Mittelgebirge mit bis zu 670 Meter hohen Erhebungen - am Übergang zur östlich gelegenen Rheinebene situiert (Abb. 1-1 und 1-2).

Dank des aus rund 450 Metern Tiefe geförderten Thermalwassers genießt Bad Bergzabern ein hohes Ansehen als Kurstadt. Dies und die Beliebtheit des Pfälzerwalds als Naherholungsgebiet führen zu einem hohen Aufkommen an Individualverkehr auf der Bundesstraße B427, der die Interessen der Einwohner und Gäste der Stadt beeinträchtigt. Daher wurde durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur der Bau einer Ortsumgehung in den Bundesverkehrswegeplan aufgenommen.



Abbildung 1-1: Luftbild der Baustelleeinrichtung am Westportal des Tunnels, im Hintergrund die Rheintal-Ebene mit der Kurstadt Bad Bergzabern.

Die Ortsumfahrung wurde 2020 öffentlich ausgeschrieben und im Februar 2021 mit einem Gesamtauftragswert von 71 Millionen Euro an die Baufirma BEMO Tunnelling GmbH vergeben. Die Inbetriebnahme soll spätestens im Frühjahr 2027 erfolgen.



Neben weiteren Erd- und Infrastrukturarbeiten, die für die Neutrassierung des Straßennetzes zum und vom Umgehungstunnel erforderlich sind, umfasst der Tunnelbau im Projekt zwei Bauwerke: einen rd. 1,5 km langen Haupttunnel sowie einen parallel verlaufenden Rettungsstollen ähnlicher Länge, aber geringeren Durchmessers. Beide Röhren sind durch sechs Querschläge miteinander verbunden. Darüber hinaus umfasst der Auftrag den Bau von rd. zwei Kilometern Straße sowie zwei Betriebsgebäuden.



Abbildung 1-2: Morphologischer Übersichtslageplan mit dem Verlauf des Tunnels südwestlich der Kurstadt Bad Bergzabern.

Der Tunnel Bad Bergzabern ist als Gegenverkehrstunnel mit einem regulären Ausbruchquerschnitt von 101 m² konzipiert (Abb. 1-3). Die maximale Überlagerung des Tunnels beträgt ca. 120 m. Zwei Pannenbuchten mit größerem Durchmesser (193 m²) befinden sich rd. 0,4 km von beiden Portalen entfernt. Der Rettungsstollen mit einem ursprünglich geplanten Querschnitt von 15 – 30 m² ist durch sechs Querschläge mit einem Ausbruchquerschnitt von 13 m² mit dem Haupttunnel verbunden. Der maximale Abstand zwischen Haupt- und Rettungsstollen beträgt rd. 17,5 m.

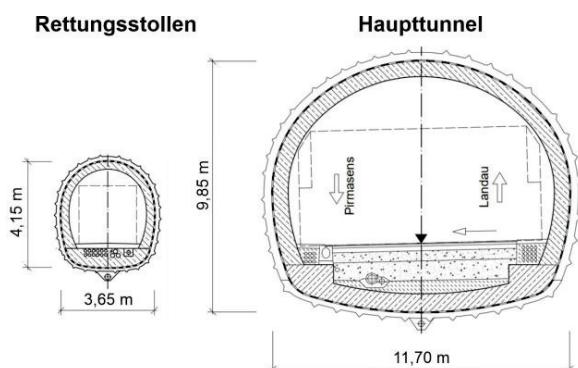


Abbildung 1-3: Regelquerschnitte von Rettungsstollen (links) und Haupttunnel (rechts) des Tunnels Bad Bergzabern.

2 Geologische Verhältnisse

2.1 Überblick

In strukturgeologischer Hinsicht liegt das Projektgebiet am westlichen Rand des Oberheintalgrabens. Dieses Gebiet ist durch Extensionstektonik innerhalb einer aktiven Grabenzone gekennzeichnet, die sich im Tertiär (vor ca. 45 Mio. Jahren) zu öffnen begann. Innerhalb dieser Grabenzone ist die Erdkruste durch zahlreiche sich überschneidende Störungen zerlegt, die Horst- und Grabenstrukturen bilden (Abb. 2-1).

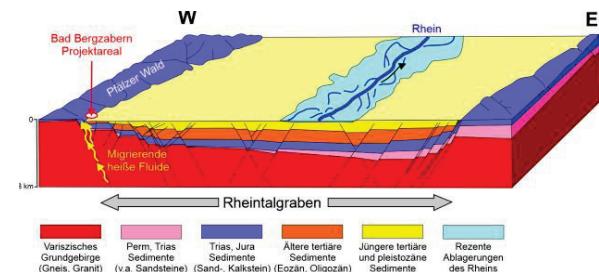


Abbildung 2-1: Schematisches geologisches Blockbild des Rheintals im Projektbereich, das die aktive Extensionstektonik sowie den Aufstieg heißer Flüssigkeiten an der westlichen Grabenschulter zeigt.

Der Tunnel Bad Bergzabern verläuft im Wesentlichen in Sandsteinen und Tonschluffsteinen des Oberen, Mittleren und Unterem Buntsandsteins. Diese Sedimentabfolgen wurden in der Trias vor etwa 250 Millionen Jahren in einem verzweigten Flusssystem abgelagert und verfestigten sich anschließend. Im Zuge der Öffnung des Rheingrabens im Tertiär wurde die Formation verkippt, von Störungen versetzt und durch aufsteigende hydrothermale Lösungen verändert (Abs. 2.2). In Oberflächennähe werden diese Vorgänge von rezenten Verwitterungsvorgängen überlagert und verstärkt.

2.2 Hydrothermale Alteration

Eine Besonderheit des Gebirges im Projektareal sind hydrothermale Alterationsphänomene im Buntsandstein (Abb. 2-2). Diese scheinen ein regional begrenztes Gebiet entlang der westlichen Schulter des Oberrheingrabens im Raum Wissembourg – Bad Bergzabern zu betreffen (Werner et al., 2014). Auch der historische Abbau von flözartigem Eisenhydroxiderz wenige Kilometer nördlich des Stadtzentrums (Griesemer, 1986) ist genetisch mit diesen Prozessen verknüpft. Weiter westlich des Projektgebiets zeigt die Buntsandstein-Formation dagegen das „normale“ Erscheinungsbild mit überwiegend tiefroter Farbe und ferritischer, bzw. silikatischer Zementierung.



Es wird davon ausgegangen, dass die Alterationsphänomene im Tertiär von heißen, kohlenwasserstoffreichen und reduzierend wirkenden Tiefenwässern verursacht wurden, die entlang der Störungen der Rheingrabenschulter aufstiegen und durch die Sandsteinabfolge migrierten (Werner, et al., 2014).



Abbildung 2-2: Buntsandsteinabfolge, die in der rechten Hälfte der Ortsbrust noch die primäre rote Farbe aufweist, während die linke Hälfte hydrothermal verändert, gebleicht und durch Eisenhydroxidausfällungen rostbraun verfärbt ist (Kalotte HT, TM 894,25).

Während die – hauptsächlich aus Quarzmineralkörnern bestehenden – Sandkomponenten von diesen Prozessen weitgehend unberührt blieben, hatte die Auflösung und Ausfällung anderer Minerale, insbesondere Eisenhydroxiden, wesentlichen Einfluss auf Art und Grad von Färbung und Kornbindung (Hübl, 1942). Auf Basis der Beobachtungen während des Tunnelvortriebs können vier „Grade“ der Veränderung unterschieden werden:

- Teilweise Verfärbung und Festigkeitsminderung:** Das Gestein weist ganz- oder teilweise noch die ursprüngliche Rotfärbung und eine nur teilweise reduzierte Festigkeit auf.
- Vollständige Entfärbung und Entfestigung:** Das Gestein ist vollständig hydrothermal zersetzt und liegt als gebleichter Quarzsand vor. Das Gestein weist keine, bzw. keine nennenswerte Kornbindung mehr auf.
- Teilweise Ausfällung von Eisenhydroxiden,** meist in Form konzentrischschaliger „Liesegang“-scher Ringe und dünner Krusten. Das Gestein hat eine überwiegend hellbraune Farbe und weist eine teilweise (sekundäre) ferritische Kornbindung auf.
- Signifikante Ausfällung von Eisenhydroxiden:** In Lagen von einigen Zentimetern bis 30 Zentimetern Mächtigkeit ist der Porenraum zwischen den Körnern vollständig mit Eisenhydroxiden ausgefüllt. Das Gestein weist eine dunkelbraune bzw. rostbraune Farbe auf und zeichnet sich durch eine hohe Gesteinsdichte und gute (sekundäre) ferritische Kornbindung aus.

3 Geotechnische Verhältnisse

3.1 Homogenbereiche

Aufgrund der komplexen regionalgeologischen Entwicklung waren die geologischen und geotechnischen Bedingungen im Tunnel Bad Bergzabern sehr heterogen und variabel. Zur Klassifizierung der verschiedenen Gebirgsverhältnisse gemäß VOB/C DIN 18312 wurde im Zuge der Vorerkundung und Ausschreibung eine Matrix aus vier Homogenbereichen erarbeitet (Abb. 3-1), die in den nachfolgenden Absätzen 3.1.1 – 3.1.4 im Detail beschrieben werden.

HB-Kürzel	X1	X2	X3	X4
Bezeichnung	Entfestigter Sandfels	Sandfels, mürbe bis entfestigt	Wechselfolge aus Sandfels und festem Sandstein	Fester Sandstein
Schematische Darstellung				
Verwitterungsgrad	V4	V4 - V2	V4 - V0	V0 / V1
Einaxiale Ge steinsdruckfestigkeit (UCS)	Lockergestein (< 1 MPa)	< 15 MPa	< 65 MPa	30 – 65 MPa

Abbildung 3-1: Übersicht Homogenbereiche X1 – X4

Abbildung 3-2 zeigt die im Rettungsstollen ange troffene Verteilung der Homogenbereiche, bei denen der Homogenbereich X3 mit einem Anteil von rd. 70 % dominiert, gefolgt von rd. 18 % HB X1 und rd. 6 % HB X2.

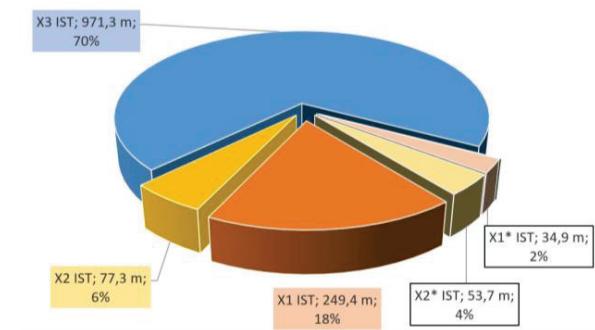


Abbildung 3-2: Tortendiagramm der aufgefahrenen Homogenbereiche X1 – X4 im Rettungsstollen.

3.1.1 X1 – Entfestigter Sandfels

Der Homogenbereich X1 beschreibt ein Gebirge aus vollständig hydrothermal zersetzen Sandstein (bzw. Sand) mit Lockergesteinscharakter (Abb. 3-3). Bedingt durch die Genese als in-situ-Zersatz besaß dieser Quarzsand jedoch eine hohe Lagerungsdichte. Unter diesen Bedingungen wurde das Gebirge mechanisch mit Tunnelbagger gelöst (Abb. 3-4).

Um Instabilitäten an Ortsbrust und Laibung zu verhindern, erforderte dieses Gebirge eine vorauselende Sicherung mit Spießschirmen - in den



Pannenbuchten des Haupttunnels auch mit Rohrschirmen - und eine unmittelbare Sicherung der Ortsbrust mit Spritzbeton und Ortsbrustankern. Im größeren Haupttunnel war ein Ausbruch in Teileflächen von nur wenigen Quadratmetern und mit sofortiger Spritzbetonversiegelung erforderlich. Nach jedem Abschlag musste ein schneller Ringschluss mittels temporärer Kalottensohle hergestellt werden.



Abbildung 3-3: Typisches Erscheinungsbild der vollständig hydrothermal zersetzen und gebleichten Sandsteine (X1).



Abbildung 3-4: Mechanische Gebirgslösung mit Tunnelbagger LH 950 in der Kalotte des Haupttunnels.

3.1.2 X2 – Sandfels, mürbe bis entfestigt

Der Homogenbereich X2 beschreibt eine geringfeste Sandsteinfolge mit einer Druckfestigkeit von unter 15 MPa. Das Nebeneinander von lockergesteinsartigen Partien und Horizonten mit Festigkeiten an der Obergrenze der Bandbreite führte in diesem Homogenbereich erstmals zu „mixed-face“-Bedingungen, die einen komplexen Abbauablauf erfordern. Während geringfeste Partien mit dem Tunnelbagger gelöst werden konnten, mussten festere Partien mit Anbaufräse oder Hydraulikmeißel gelöst werden.

Auch der Stützmitteleinsatz im Homogenbereich X2 variierte in Abhängigkeit der Verhältnisse an der

Ortsbrust. Bei stark verwittertem / alteriertem Gebirge mit einem hohen Anteil lockergesteinsartiger Partien wurde das gleiche Verfahren wie in Homogenbereich X1 angewendet, d.h. Spießschirm, Ortsbrustanker, Ortsbrustversiegelung und Einbau einer temporären Kalottensohle. Bei homogeneren, bzw. festeren Gebirgsverhältnissen konnten die Ortsbrustanker durch einen Stützkeil im Zentrum der Ortsbrust ersetzt werden. Zudem konnte die Abschlagslänge mit dem Vorherrischen festerer Gesteinspartien auf bis zu rund 1,2 m erhöht werden.

3.1.3 X3 – Wechselfolge

Der Homogenbereich X3 wurde als Wechselfolge von zersetzen, geringfesten und festen Sandstein definiert. Er deckt ein sehr breites Spektrum an Verwitterungs- / Alterationszuständen und Gesteinsdruckfestigkeiten (0 – 65 MPa) ab. Aufgrund der ausgeprägt heterogenen Bedingungen an der Ortsbrust mussten sowohl mechanisches Lösen als auch Sprengabtrag in Kombination eingesetzt werden („mixed face“). Wie im Homogenbereich X2 hingen die Stützmaßnahmen von der tatsächlichen Beschaffenheit der Ortsbrust ab und umfassten eine Regelsicherung der Laibung (mit Spritzbeton und Systemankerung) sowie die optionale Sicherung von Teilen der Ortsbrust.

3.1.4 X4 – Fester Sandstein

Der Homogenbereich X4 basiert auf der Annahme einer vollflächigen, festen und weitgehend unveränderten Sandsteinabfolge mit einer Einaxialen Druckfestigkeit von 30 bis 65 MPa. Derartige Verhältnisse wurden während der Vortriebsarbeiten weder im Rettungsstollen, noch im Haupttunnel angetroffen.

4 Herausforderungen im Vortrieb

4.1 Monitoring und Vortriebssteuerung

Die kleinräumigen Veränderungen von Verwitterungs- / Alterationszustand und Festigkeit des Gebirges stellten eine große Herausforderung für die Steuerung und die Sicherheit der Tunnelarbeiten dar. Erschwerend kam hinzu, dass die Gebirgseigenschaften nicht mit den strukturellen Verhältnissen des Gebirges, wie Schicht- oder Kluftrichtungen verknüpft waren, sodass die Abfolge fest- und lockergesteinsartiger Bereiche faktisch nicht prognostizierbar war. Derartige Verhältnisse waren bereits in der Vorerkundung erkannt worden und das System aus Homogenbereichen und Vortriebsklassen war in der Lage, dieser Heterogenität Rechnung zu tragen. Ein weiterer Sicherheitsfaktor war die Vorgehensweise, den Rettungsstollen stets vorlaufend vor dem

Haupttunnel aufzufahren, womit dieser der Voraus erkundung der geologischen Verhältnisse und der Vorausentwässerung des Gebirges dienen konnte.



Abbildung 4-1: Einvernehmliche ingenieurgeologische Ortsbrustdokumentation im Rettungsstollen.

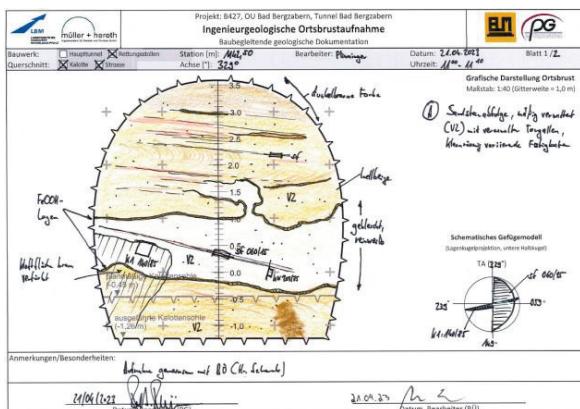


Abbildung 4-2: Deckblatt einer einvernehmlichen Ortsbrustaufnahme mit der zeichnerischen Darstellung der Ortsbrust und dem Gefügemodell.

Um eine Anpassung der Vortriebsmethoden und Stützmaßnahmen an die aktuellen Gebirgsbedingungen zu ermöglichen, wurde in enger Zusammenarbeit von Auftraggeber, Auftragnehmer und deren Dienstleistern eine tägliche Routine zur geotechnischen Beobachtung etabliert. Zu dieser gehörten eine kontinuierliche Inaugenscheinnahme der Ortsbrustsituation, die tägliche ingenieurgeologische Kartierung (Abb. 4-1), fallweise Erkundungsbohrungen sowie laufende Konvergenzmessungen.

Besonders positiv hervorzuheben ist dabei die einvernehmliche ingenieurgeologische Dokumentation (Abb. 4-2) im „Vier-Augen-Prinzip“ durch die auf AN- und AG-Seite tätigen Geologenteams im Sinne der ÖGG-Empfehlung für die baugeologische Dokumentation bei der Ausführung von Untertagebauwerken

(Plinninger et al., 2023). Diese Vorgehensweise hat nach Überzeugung der Autoren erheblich zu einem gemeinsamen Verständnis der geologischen und geotechnischen Situation auf der Baustelle beigetragen.

4.2 Beherrschung fließfähiger Gebirgsverhältnisse

Im Februar 2022 stieß der Rettungsstollen nach ca. 450 m Vortrieb unerwartet auf eine Kombination von zersetzen Sandstein (Homogenbereich X1) und erheblichen Wasserzutritten infolge eines offenbar über der Tunnelfirste liegenden Grundwasserspiegels. In dieser Situation musste das potenzielle Risiko des Eindringens von losem Sand in den Tunnel (Gebirgsverhalten „fließendes Gebirge“) berücksichtigt werden und der Vortrieb wurde im gegenseitigen Einvernehmen aller Projektbeteiligten sofort eingestellt. Zusätzliche Maßnahmen mussten ergriffen werden, um ein ausreichendes Arbeitssicherheitsniveau wiederherzustellen. Innerhalb von weniger als einer Woche wurde ein geeignetes Entwässerungssystem geplant und vor Ort umgesetzt. Die Entscheidungen berücksichtigten unter anderem die spezifischen Erfahrungen, die der Auftragnehmer mit dieser Art von Vorausentwässerung beim Bau des 3,6 km langen Kramertunnels bei Garmisch-Partenkirchen in den Jahren 2019 bis 2022 gesammelt hatte.



Abbildung 4-3: Vorausentwässerungsmaßnahmen mit Vortriebsbohrausrüstung und System AT76 im Rettungsstollen.

Die zusätzlichen Wasserhaltungsmaßnahmen für den Rettungsstollen umfassten eine Querschnittsvergrößerung über eine Länge von vier Abschlägen (≈ 4 m). Von dort aus wurden mindestens acht Entwässerungsbohrungen mit jeweils rd. 12 m Länge unter Verwendung eines DSI AT76 3"-Rohrsystems gebohrt (Abb. 4-3). Um den Grundwasserspiegel unter die Sohle abzusenken, waren die Bohrungen teilweise nach unten geneigt und unter Vakuum gesetzt.



Als sich in der Hauptröhre ähnliche Bedingungen abzeichneten, wurden auch dort angepasste Entwässerungsmaßnahmen durchgeführt. Eine effektive Gebirgsdrainage wurde durch den Einsatz eines oder mehrerer subhorizontaler (30° geneigter) 12"-Drainagerohre mit einer Länge von 24 m vor der Ortsbrust (Abb. 4-4) in Kombination mit vertikalen 12"-Brunnen im Abstand von ca. 30 m und einer Tiefe von 14 m erreicht, die von der Sohle der Kalotte aus gebohrt wurden. Für diese längeren und größeren Bohrlöcher kam eine spezielle Bohranlage für verrohrte Drehbohrungen zum Einsatz. Durch den Einsatz dieser Entwässerungsmaßnahmen konnten Rettungsstollen und Haupttunnel erfolgreich und sicher unter dem ursprünglichen Niveau des Grundwasserspiegels vorgetrieben werden.

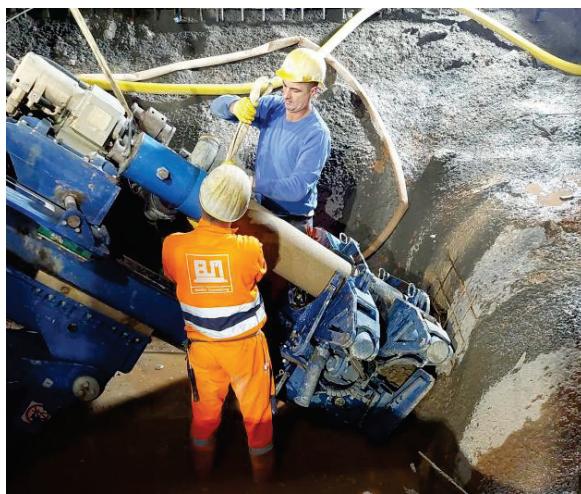


Abbildung 4-4: Verrohrte Vorausentwässerungsbohrung 12" in der Kalottensohle des Haupttunnels.

5 Fazit

Die Untergrundverhältnisse beim Vortrieb von Rettungsstollen und Haupttunnel Bad Bergzabern waren durch eine Abfolge extrem heterogener und strukturell unprognostizierbarer Gebirgsverhältnisse gekennzeichnet, die sich aus der mehrstufigen geologischen Entwicklung an der Schulter des tektonisch aktiven Rheingrabensystems ergaben. Diese Bedingungen stellten die Tunnelarbeiten vor zahlreiche Herausforderungen, um einen sicheren und wirtschaftlichen Tunnelvortrieb zu gewährleisten.

Die wechselhaften Gebirgsverhältnisse erforderten ständige Anpassungen und häufige Wechsel der Gebirgslösung und Stützmittel: Die Lösemethoden reichten von vollflächig mechanischem Ausbruch mit Tunnelbaggern bis zum vollflächigen Sprengvortrieb. „Mixed-face“-Bedingungen, die ein Nebeneinander von teilweisem Sprengen und teilweisem mechanischen Lösen des Gebirges erforderten, waren häufig. Der Vortrieb in lockergesteinsartigem zersetzt-

Sand erforderte aufwendige Stützmaßnahmen, u.a. vorauselnde Sicherung mittels Rohr- und Spießschirmen, Öffnen der Ortsbrust in Teilflächen sowie sofortige Versiegelung der Ortsbrust und Laibung.

Im mittleren Abschnitt der beiden Tunnel führte ein unerwartet hoher Grundwasserspiegel in Kombination mit zersetzen Sandstein zu zusätzlichen Sicherheitsrisiken, die dringende Gegenmaßnahmen erforderten und zur Umsetzung zusätzlicher Vorausentwässerungsmaßnahmen führten.

Die geotechnischen Herausforderungen beim Vortrieb des Tunnel Bad Bergzabern konnten dennoch in stets enger und konstruktiver Zusammenarbeit zwischen Auftraggeber, Auftragnehmer und geotechnischen Beratern erfolgreich bewältigt werden. Der Vortrieb stellt damit eindrucksvoll die Vielseitigkeit und Flexibilität der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise unter Beweis, wenn diese durch eine kompetente geologische und geotechnische Begleitung unterstützt wird.

Literaturverzeichnis

DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2018): DIN EN ISO 14689: *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels*, Deutsche Fassung EN ISO 14689:2017, Berlin (Beuth).

DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2019): DIN 18312 - *Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV)*, DIN 18312: *Untertagebauarbeiten*, September 2019, Berlin (Beuth).

Griesemer, T.W. (1986): *Timoleon Calmelet's Beschreibung der Eisenerzgruben in der Umgebung von Bad Bergzabern*.- in: Mitt. Pollochia, 73: S. 5-48, Bad Dürkheim, 1985.

Hübl, H. (1942): *Der gebleichte Mittlere Buntsandstein von Bergzabern-Westmark - eine gesteinskundlich-technische Betrachtung*.- in: Beiträge zur naturkundlichen Forschung in Südwestdeutschland, 7, S. 301-358, Karlsruhe.

Plinninger, R.J., Scholz, M. & Hollmann, F. (2023): *Die ÖGG-Empfehlung für die baugeologische Dokumentation bei der Ausführung von Untertagebauwerken (2022) und ihre Anwendung aus deutscher Sicht*- in: DGGT e.V. (Hrsg.): Tagungsband der Fachsektionstage 2023, Würzburg, 12./13.09.2023, S. 274-278, ISBN: 978-3-946039-10-5, Essen (DGGT).

Werner, W., Wittenbrink, J. Bock, H. & Kimmig, B. (2014): *Naturwerksteine aus Baden-Württemberg - Vorkommen, Beschaffenheit und Nutzung*, 1. Auflage 2014, 765 Seiten, Freiburg (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau).