

Höhenfreie Tunnelkreuzung Füllbach-Höhnberg auf der NBS Ebensfeld-Erfurt

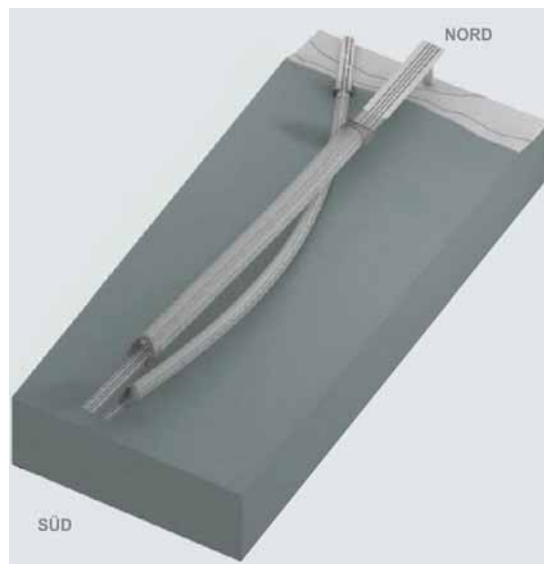
Dipl.-Ing. Ulrich Sieler, Dr. Ing. (habil.) Yifeng Hu, beide: Grundbauinstitut und Institut für Statik, beide: TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH, Würzburg, Deutschland

Der Tunnel Höhnberg ist Teil der Hauptstrecke Nürnberg-Erfurt. Südlich von Coburg schwenkt der eingleisige Tunnel Füllbach aus der Hauptstrecke aus und führt in einem weiten Bogen unter dem Tunnel Höhnberg zum Bahnhof Coburg. Im Kreuzungsbereich haben die Tunnel einen senkrechten Abstand von etwa 15 m. Aus planerischen Zwängen war oberhalb der Kreuzung die Anordnung der Deponie für die Ausbruchmassen der Voreinschnitte und Tunnel erforderlich. Für diese Deponie war geplant, etwa die Hälfte der Gesamthöhe von 25 m nach Auffahren der Tunnel zu schütten. Die Vorbemessung für den Tunnel Füllbach ergab, dass er unter der Lastumlagerung aus dem Bau des Tunnels Höhnberg und den Lasten der nachträglich geschütteten Deponie nicht in Spritzbeton ausführbar war. Aufgrund baubetrieblicher Bemühungen der ausführenden ARGE konnte die Deponie mit dem Material aus den Voreinschnitten vorlaufend zu beiden Vortrieben geschüttet werden. Damit war der Tunnel Füllbach mit einer 45 cm dicken Spritzbetonschale unter Annahme von Betongelenken rechnerisch nachweisbar. Während der Schüttung wurde das Gebirgsverhalten mit Extensometern überwacht. Die Ergebnisse zeigten, dass in diesem Bereich deutlich höhere Gebirgssteifigkeiten als prognostiziert vorhanden waren. Die Schalenstärke konnte daraufhin auf 35 cm reduziert werden. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung war der Tunnel Füllbach im Deponiebereich problemlos aufgefahren, die Querung mit dem Tunnel Höhnberg steht noch bevor.

Crossing of the tunnels Höhnberg and Füllbach in course of the new rail line Nuremberg-Erfurt: The Höhnberg tunnel is part of the main line Ebensfeld-Erfurt, the central part of the high speed rail connection Munich-Berlin. An additional single-rail tunnel was needed to link to the city of Coburg. This Füllbach tunnel crosses the Höhnberg tunnel with a clearance of approximately 15 m. Due to design restrictions the landfill for the excavated material with a total height of 25 m had to be placed exactly over the crossing area. Additionally it was planned to dump the landfill at least partly after the tunnel drives. Preliminary design calculations showed that a structural analysis of the tunnel Füllbach could hardly be done under these circumstances. The construction company made it possible to finish the landfill before the tunnel drives reached the crossing area. The Füllbach tunnel was designed with a 45 cm shotcrete shell. In the structural analysis concrete hinges were taken into account. A measuring cross section with two deep extensometers was installed in the center of the landfill. The results of the measurements while dumping the landfill showed a substantially stiffer behaviour of the sandstones and clay stones than expected. Therefore the shotcrete shell thickness could be reduced to 35 cm. The drive of Füllbach tunnel in the landfill area has been executed without problems at the time of this report, the drive of the Höhnberg tunnel is still under advance.

Querungen von Tunneln im Keuper sind oberflächennah an verschiedenen Stellen bereits mehrfach erfolgreich durchgeführt worden. Mit der Querung des Tunnels Höhnberg durch den Tunnel Füllbach bei einer Überlagerung von maximal 45 m und der nachträglichen Aufschüttung einer Deponie wurde jedoch der übliche Erfahrungsbereich verlassen. Der Tunnel Höhnberg in bergmännischer, zweigleisiger Bauweise, ist Bestandteil des Teilprojekts VDE 8. 1 der Neubaustrecke Ebensfeld-Erfurt des Verkehrsprojekts VDE 8 Bahnstrecke München-Nürnberg-Leipzig-Berlin. Bei einer maximalen Überdeckung von 30 m weist er eine Länge von 824 m auf. Von Süden kommend, zweigt der eingleisige Tunnel Füllbach auf der Ostseite aus, um in einem Bogen in den westlich gelegenen Bahnhof Coburg zu führen. Der Tunnel Füllbach unterfährt mit einer Überdeckung von etwa 15 m den Tunnel Höhnberg. Er ist insgesamt 1.113 m lang, und die maximale Überdeckung ergibt sich im Kreuzungsbereich mit etwa 45 m. Die räumliche Situation ist im Bild 1 dargestellt.

Bild 1. Querung der Tunnel Höhnberg und Füllbach.



Sieler und Hu:

Höhenfreie Tunnelkreuzung Füllbach-Höhnberg auf der NBS Ebensfeld-Erfurt

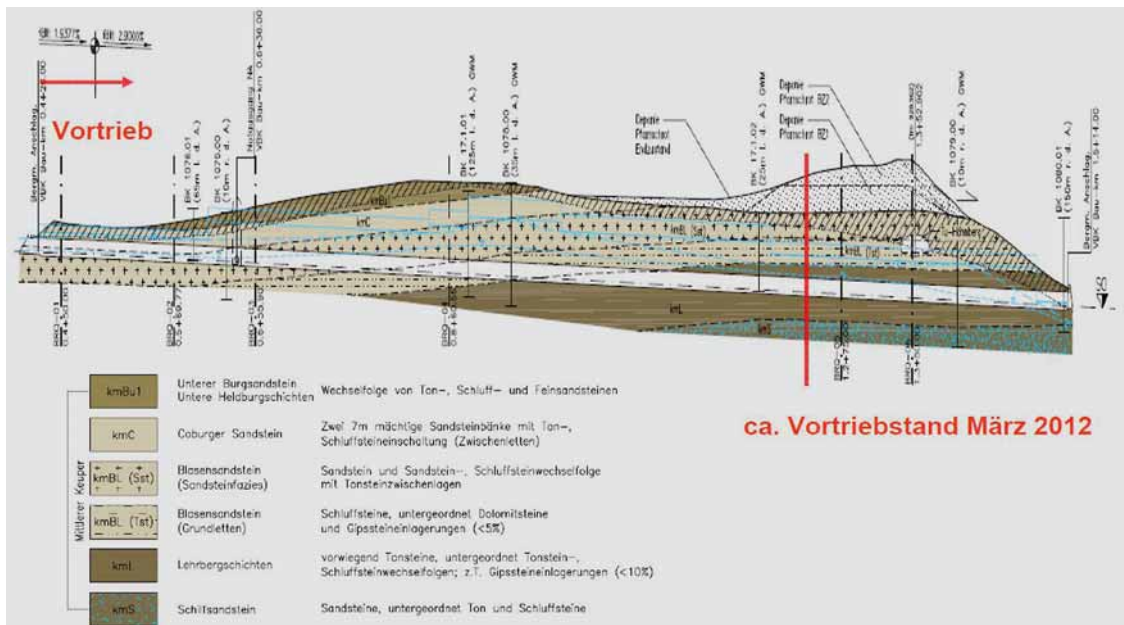


Bild 2. Geologischer Längsschnitt des Tunnels Füllbach.



Bild 3. Geologischer Längsschnitt des Tunnels Höhnberg.

Geologie

Geologische Längsschnitte der Tunnel Füllbach und Höhnberg sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt. Der Tunnel Höhnberg wird im Coburger Sandstein und Blasensandstein des mittleren Keupers aufgeföhren. Der Tunnel Füllbach verläuft in weiten Bereichen in den den Blasensandstein unterlagernden Gesteinen der Lehrbergsschichten. Hierbei handelt es sich um ein überwiegend toniges Gestein mit einem geringen Verformungsmodul (Bild 4).

Die Sandsteine und Tonsteine des mittleren Keupers sind veränderlich feste Gesteine. Die Sandsteine sind nach DIN 1054 in die Kategorie mäßig mürb bis mäßig hart mit einaxialen Druckfestigkeiten in der Regel unter 50 MPa einzustufen. Die Tonsteine

sind in der Regel mürb bis mäßig mürb mit einaxialen Druckfestigkeiten kleiner 5 MPa bis 12,5 MPa. Insbesondere die Tonsteine können bei Wasserzutritt im Vortrieb zerfallen und sich bis zu einem wasserhaltenden Schlamm zersetzen. Der Vortrieb wurde als Sprengvortrieb, in weiten Bereichen auch als Baggervortrieb mit Sprengunterstützung, geplant und entsprechend ausgeführt.

Vortriebserföhrenungen

Die bisher angetroffenen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse stimmen weitestgehend mit der Prognose überein (Bild 4). Die Vortriebe wurden überwiegend mit vorseilender Sicherung und einer Abschlagslänge von 1,0 bis 1,5 m

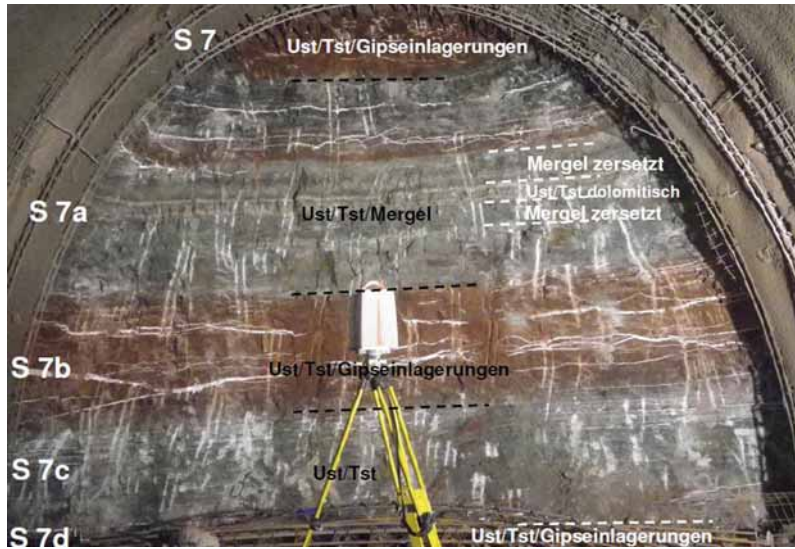


Bild 4. Ortsbrust beim Vortrieb des Tunnels Füllbach.

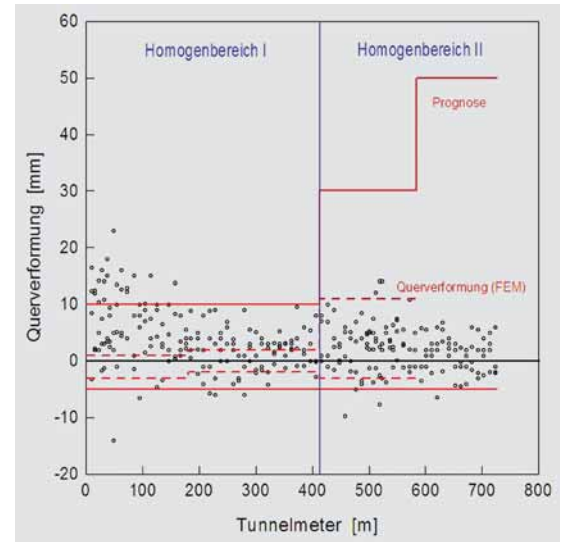


Bild 5. Gemessene und berechnete Querverformungen im Tunnel Füllbach.

aufgefahren. Dabei stellten sich Firstsenkungen von 6 bis 20 mm und Horizontalverformungen in den Ulmen von etwa 10 mm beidseitig ein. Die Verformungen klingen rasch nach dem Einbau der Messquerschnitte, in der Regel innerhalb von drei bis fünf Tagen ab. Unter Berücksichtigung der Erfahrungen von anderen Stellen bedeutet dies, dass das Keupergebirge im näherungsweise linear-elastischen Spannungsbereich verbleibt und ein ausreichender Abstand zu eventuellen Bruchzuständen gegeben ist.

Die gemessenen Horizontalverformungen liegen beim Tunnel Füllbach (Bild 5) in der Größenordnung der Prognosen (Homogenbereich I, z. T. darüber) beziehungsweise der Berechnungsergebnisse (Homogenbereich II). Dies deutet in Übereinstimmung mit Erfahrungen an anderen Stellen auf einen vergleichsweise hohen Seitendruckbeiwert des Keupergebirges hin.

Rechenwerte und Berechnungen für den Entwurf und Abgleich beim Vortrieb

Die Spritzbetonschale der Tunnel wurde vom Tragwerksplaner mit zweidimensionalen FE-Berechnungen nachgewiesen. Für die Innenschale kommen nach den Empfehlungen des tunnelbautechnischen Gutachtens Stabzugmodelle zur Anwendung.

Die Rechenwerte der einzelnen Homogenbereiche sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Aus der Auswertung der Erfahrungen der ersten etwa 400 m Vortrieb im Tunnel Füllbach ergab sich, dass die tatsächlich angenommenen Schwankungsbereich liegen (Tabelle 2).

Zu Beginn des Vortriebs des Tunnels Füllbach verläuft er in einer Länge von rund 175 m (bis Baukm 0,6+00) nahezu parallel zu dem Voreinschnitt des Tunnels Höhnberg (Bild 6). Der minimale Abstand von der Böschungsoberkante zum Tunnel beträgt rund 6 m. Zum Zeitpunkt der statischen

Berechnung und ihrer Prüfung war noch nicht klar, ob der Voreinschnitt zum Zeitpunkt des Vortriebs aufgefahren oder in Bearbeitung ist.

Tabelle 1. Rechenwerte für den Entwurf des Tunnels Füllbach.

Homogenbereich		I	II	Ila
Stratigraphische Einheit	[-]	kmC, kmBL (Sst)	kmBL (Tst), kmL	kmBL (Tst), kmL
Wichte γ (feucht)	[kN/m ³]	24	24	23
E_v -Modul	[MN/m ²]	120 bis 600	80 bis 200	70 bis 120
E-Modul	[MN/m ²]	350 bis 1.500	250 bis 500	200 bis 350
Reibungswinkel ϕ des Gebirges	[°]	25,0 bis 35,0	22,5 bis 27,5	17,5 bis 25,0
Kohäsion c des Gebirges	[kN/m ²]	150 bis 300	100 bis 200	80 bis 150
Reibungswinkel ϕ in Trennfläche	[°]	17,5 bis 25,0	15,0 bis 22,5	15,0 bis 22,5
Gebirgslast p_v im Haupttunnel	[kN/m ²]	120 bis 160	130 bis 175	140 bis 190
Poissonzahl ν	[-]	0,25	0,30	0,33

Tabelle 2. Rechenwerte nach ersten Vortriebserfahrungen im Tunnel Füllbach.

Homogenbereich		I	Ila	
		TM 0 bis TM 411	TM 1.055 bis TM 1.088	
Blockeinteilung	[-]	Block 004 - 020	Block 021 - 037	Block 089 - 091
Wichte γ (feucht)	[kN/m ³]	24	24	23
E_v -Modul	[MN/m ²]	120	360	70
E-Modul	[MN/m ²]	350	925	200
Reibungswinkel ϕ des Gebirges	[°]	25	30	17,5
Kohäsion c des Gebirges	[kN/m ²]	150	225	80
Gebirgslast p_v im Haupttunnel	[kN/m ²]	120	140	140
Poissonzahl ν	[-]	0,25	0,30	0,33

Sieler und Hu:

Höhenfreie Tunnelkreuzung Füllbach-Höhnberg auf der NBS Ebensfeld-Erfurt

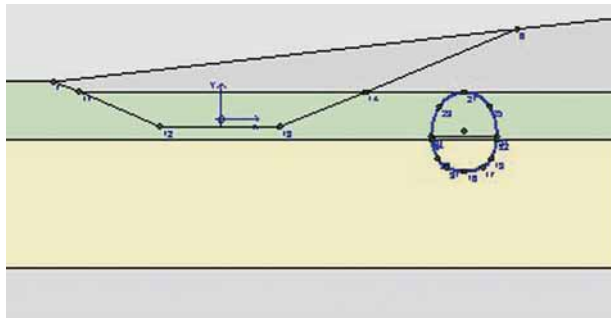


Bild 6. Vortrieb neben der Böschung.

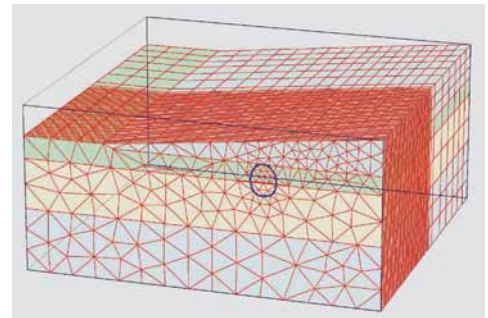


Bild 7. 3D-Modell des Vortriebs neben der Böschung.



Bild 8. Deponie über Tunnelkreuzung.

Zur Untersuchung der interaktiven Wirkung der beiden Baumaßnahmen beziehungsweise der Standsicherheit und Ausführbarkeit wurden seitens des Prüflingenieurs dreidimensionale Berechnungen des Tunnels Füllbach unter Berücksichtigung des Vortriebsablaufs neben dem Voreinschnitt durchgeführt (Bild 7). Dabei wurde der Bauablauf rechnerisch in Kalotten- und Strossen- beziehungsweise Sohlteilvortrieben simuliert. Für den Aushub des Voreinschnitts in diesem Bereich wurde sowohl die Ausführung vor dem Vortrieb (Variante I) als auch nach dem Vortrieb (Variante II) des Tunnels Füllbach untersucht. Die numerischen Berechnungen ergaben, dass die Gesamtstandsicherheit der Voreinschnittsböschung und des Tunnels Füllbach bei den zwei Varianten rechnerisch identisch und

weit entfernt von dem Grenzzustand der Tragfähigkeit ist. Die resultierenden Normalkräfte der Außenschale sind bei der Variante I höher als bei der Variante II, während die Biegemomente bei beiden Varianten nur geringfügig unterschiedlich sind. Sowohl bei einer vorauseilenden, als auch bei einer nachlaufenden Öffnung des Voreinschnitts können die resultierenden Schnittkräfte vom gewählten Querschnitt aufgenommen werden.

Für den Bereich der Deponie wurden zweidimensionale Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente durchgeführt [1]. Die Situation ist im Bild 8 erkennbar. Die ersten Berechnungen ergaben, dass der Tunnel Füllbach unter den nachträglich auftretenden Lasten aus der Auffahrung des Tunnels Höhnberg und den danach auftretenden Lasten aus der Deponieschüttung nicht ausführbar auszulegen war. Die Berechnungen ergaben nicht ausführbare Spritzbetonquerschnitte und Bewehrungsgehalte. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf die starke Spannungskonzentration im Bereich zwischen den Tunneln infolge des gewölbartigen Lastabtrags über dem Tunnel Höhnberg. Dieser hochbelastete Bereich wäre dann im zweiten Rechenschritt mit der großflächigen Last aus dem Deponiekörper belastet worden, woraus sich sehr starke asymmetrische Belastungen des Tunnels Füllbach ergeben hätten.

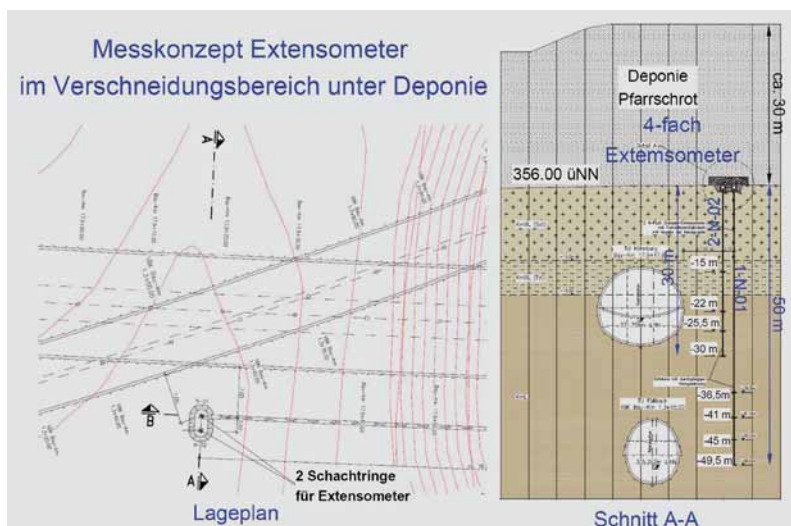
Rechentechisch wurden deshalb Fließgelenke in der Schale des Tunnels Füllbach angesetzt, die konstruktiv nicht weiter ausgebildet werden mussten. Um auch unter dieser Annahme eine ausführbare Schalenstärke zu erhalten, musste die Schüttung der Deponie vorgezogen werden. Trotzdem war die Standsicherheit rechnerisch nur mit einer 45 cm dicken Spritzbetonschale, die als noch ausführbar beurteilt wurde, nachzuweisen.

Deponieschüttung und begleitende Messungen

Seitens der ausführenden Firma wurde das Vorgehen derart umgeplant, dass die Deponieschüttung vor dem Auffahren des Tunnels Füllbach in diesem Bereich weitgehend fertig gestellt werden konnte. Hierzu wurden die Abtrags- und Transportleistungen im Bereich des Voreinschnitts Nord maximiert.

Zur Bewertung des Gebirgsverhaltens war im Bereich der Deponie ein Extensometerquerschnitt mit je zwei 4-fach-Extensometern, eins im Höhenbereich des Tunnels Höhnberg und eins im Höhenbereich

Bild 9. Messkonzept im Bereich der Deponie.



des Tunnels Füllbach eingebracht worden (Bild 9). Die Extensometer waren unter dem höchsten Punkt der Deponie angeordnet und wurden während der Schüttung fernabgefragt. Die zum Jahresanfang 2012 vorliegenden Messergebnisse erlaubten die Aussage, dass sich die Verformungen überwiegend auf den aufgelockerten Nahbereich der ehemaligen Geländeoberfläche konzentrierten (Bilder 10 und 11). Die Deponie war mit einer aktuellen Schütthöhe von 22,5 m über dem ehemaligen Gelände weitgehend fertig gestellt. Die Gesamtsetzung der ehemaligen GOK lag in der Größenordnung von 80 mm, die Relativverformungen zwischen den tieferen Extensometermesspunkten im Bereich weniger Millimeter. Hieraus ergaben sich in der Rückrechnung Steifemodule in der Größenordnung von 2.000 bis 5.000 MPa, die etwa um den Faktor 5 größer als die aus der Vorerkundung abgeleiteten sind. Die Ergebnisse der einfachen Rückrechnung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Wegen der grundsätzlich anderen Spannungsverteilung bei der großflächigen Aufschüttung (weitgehend schubspannungsfrei) verglichen mit den Spannungen im Umfeld des Tunnels beim bergmännischen Auffahren (starke Schubspannungsbelastung), war eine direkte Übertragung der aus den Messergebnissen rückgerechneten Werte in die FE-Berechnungen nicht möglich. Dabei waren auch die bisherigen Vortriebserfahrungen zu berücksichtigen, die nahelegten, dass die ursprünglichen Rechenwerte zutreffend waren. Nach Diskussion der Projektbeteiligten konnten die Berechnungskennwerte für den Querungsbereich jedoch soweit angehoben werden, dass die Ausführung mit einer 35 cm starken Schale rechnerisch möglich war. Zum Zeitpunkt der Schriftlegung war der Tunnel Höhnberg noch nicht bis zum Querungsbereich aufgefahren, und die bis dahin vorliegenden Messergebnisse aus dem Vortrieb des Tunnels Füllbach sind unauffällig.

Bisherige Erfahrungen und Folgerungen

Querungen von Tunneln im Keuper sind oberflächennah an verschiedenen Stellen bereits mehrfach erfolgreich durchgeführt worden. Mit der Querung des Tunnels Höhnberg mit dem Tunnel Füllbach bei einer Überlagerung von maximal 45 m und der nachträglichen Aufschüttung einer Deponie wurde jedoch der übliche Erfahrungsbereich verlassen. Dies zeigte in der Berechnung unerwartet große Schwierigkeiten. Durch baubetriebliche Umstellungen konnte das größte Hindernis, die nachträgliche Deponieschüttung, ausgeräumt werden. Der Vortrieb selbst bei beiden Tunneln verläuft unauffällig mit Vortriebsgeschwindigkeiten von etwa 5 m in der Kalotte und etwa 3 m pro Tag in Strosse und Sohle. Der Fassung der geringen zutretenden Wassermengen wird entsprechende Aufmerksamkeit gewidmet, sodass Aufweichungen des Gesteins auf ein Minimum begrenzt werden können. Mit dem Durchschlag der Tunnel ist im Jahr 2012, mit der Fertigstellung der Innenschalen 2013 zu rechnen.

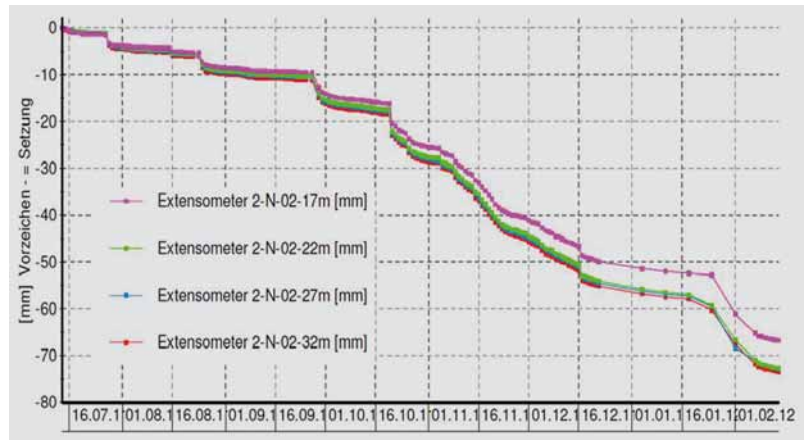


Bild 10. Messergebnisse im Tiefenbereich Höhnberg.

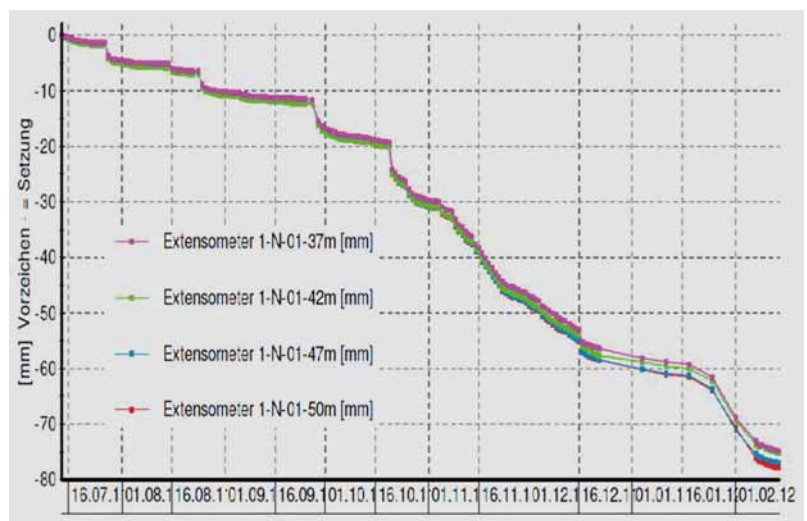


Bild 11. Messergebnisse im Höhenbereich Füllbach.

Tabelle 3. Rückrechnung von Steifigkeiten aus Extensometermessungen im Vergleich zu den Annahmen in der Ausführungsstatik.

Felsformation	Annahmen in Ausführungsstatik		Rückrechnung aus Messergebnissen Steifemodul E_s [MPa]
	untere Werte	Charakteristische Werte	
kmBL (Sst)	350		110
kmBL (Tst)	250	375	360
kmL (in Tiefe TU Höhnberg)			3.100 bis 17.800 (im Mittel 5.300)
kmL (in Tiefe TU Füllbach)	250	375	1.200 bis 5.600 (im Mittel 1.850)

Quellennachweis

[1] Ingenieurbüro Müller-Hereth, Freilassing: Stand sicherheitsnachweise Tunnel Füllbach – FE-Berechnungsquerschnitte Interpretation der Ergebnisse für den Tunnel Füllbach, NBS Ebensfeld-Erfurt Anbindung Coburg Süd. Bericht-Nr. 3110 130501 00119 021, 22. Juni 2011 (unveröffentlicht).