

Erkundungsbauwerk im Bereich des Zwischenangriffs Umpfental; Auswertung und Interpretation

Exploratory structure at access adit Umpfental of Boßlertunnel, evaluation and interpretation

Dipl.-Ing. Dieter Schmitt, Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann

Zusammenfassung

Im Zuge der Planung und Bauausführung des Boßlertunnels wird untersucht, ob und inwieweit eine Verlängerung des maschinell aufzufahrenden Tunnelabschnitts über den vertraglich vereinbarten Bau-km 42,1 hinaus möglich ist. Von wesentlicher Bedeutung ist der im Aalenium 2 (a2) liegende Tunnelabschnitt, für den auf der Grundlage der Ergebnisse der Vorerkundung druckhafte Gebirgsverhältnisse prognostiziert wurden. Die maßgebenden Schichten des a2 wurden daher vom Zwischenangriffsstollen aus mit Hilfe eines Erkundungsschachtes und eines horizontalen Erkundungsstollens aufgeschlossen. Die Arbeiten, die durch ein intensives Monitoring sowie durch Feld- und Laborversuche begleitet wurden, wurden im November 2014 abgeschlossen. Die Ergebnisse des geotechnischen Monitorings wurden ausgewertet und mit Hilfe räumlicher FE-Berechnungen interpretiert. Auf dieser Grundlage konnten die felsmechanischen Kennwerte der Schichten des a2 überprüft und fortgeschrieben werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen erwarten, dass der Tunnelabschnitt im Aalenium 2 bei entsprechender Dimensionierung der Tübbingschale mit der TVM aufgeföhren werden kann.

Executive Summary

In the course of the design and construction of the Boßler tunnel it is investigated whether and how it is possible to extend the tunnel sections, which are excavated with a tunnel boring machine, in comparison with the lengths determined in the contract. In this connection, the tunnel section located in the formation Aalenium 2 (a2), for which squeezing conditions are expected, is of major importance. Therefore, a vertical exploration shaft and a horizontal exploration gallery have been excavated starting from the intermediate access, in order to explore the decisive layers of the a2 formation. These works have been accompanied by an intensive monitoring program as well as field and laboratory testing. They were finalized in November 2014. The results of geotechnical monitoring were evaluated and then interpreted with the aid of three-dimensional finite element analyses. On this basis, the rock mechanical parameters of the layers of a2 could be verified and actualized. On the basis of the results of the exploration, it can be expected that the tunnel section crossing Aalenium 2 can be driven with a tunnel boring machine, if the segmental lining is correspondingly dimensioned.

1. Vorgaben der Ausschreibung

Beim Bau des Boßlertunnels sind ausgehend vom Portal Aichelberg die Schichtglieder Aalenium 1, Aalenium 2 und Bajocium bis Callovium des Braunjuras zu durchfahren. In

weiterer Folge kommt der ca. 8.800 m lange Tunnel in den Schichten des Weißjuras zu liegen. Im Bereich des Braunjuras beträgt die maximale Überdeckung der Tunnelfirste ca. 280 m. Sie wird in den Schichten des Aalenium 2, am Übergang zum Aalenium 1 erreicht (Bild 1).

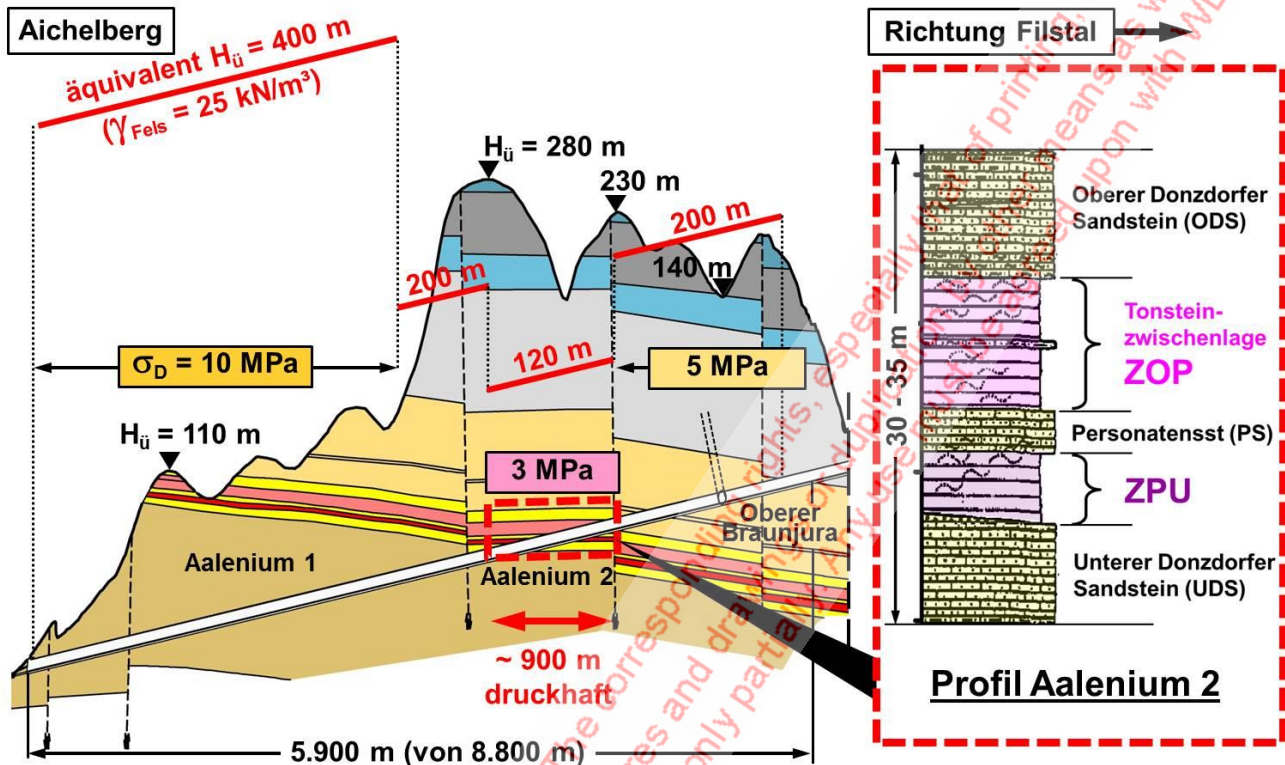
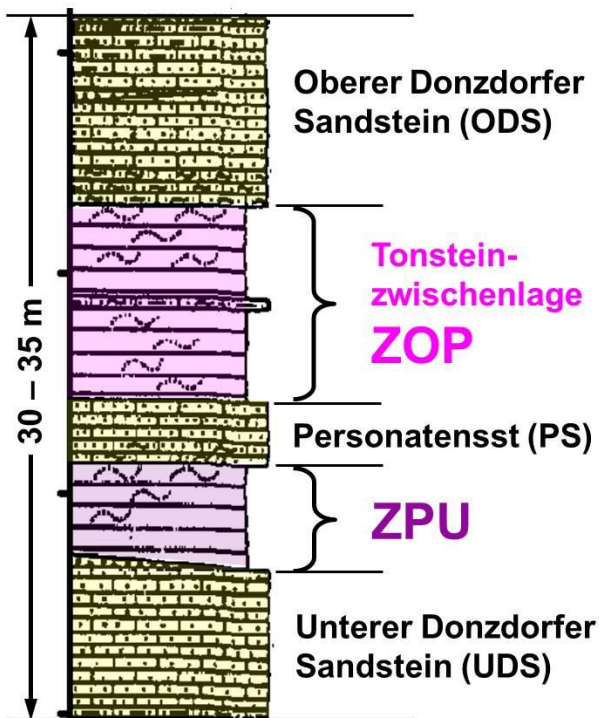


Bild 1: Längsschnitt Boßlertunnel, Abschnitt im Braunjura

Im Zuge der Planung des Albaufstiegs wurden verschiedene Trassenvarianten untersucht. Dazu wurde auch eine intensive Vorerkundung der Baugrundverhältnisse mit insgesamt 6 Erkundungsphasen durchgeführt. Nach Festlegung der Trasse wurden die Ergebnisse der Baugrunderkundung zusammengefasst und auf dieser Grundlage im Jahre 2010 das Tunnelbautechnische Gutachten für den Boßlertunnel erstellt. Im Rahmen der Vorerkundung wurden u. a. die einaxialen Druckfestigkeiten der Gesteine ermittelt. Dividiert man diese Werte durch die Wichte des Fels, so erhält man die Überlagerungshöhe, bei der das Gewicht des überlagernden Gebirges gerade der einaxialen Druckfestigkeit entspricht. Die so ermittelten Überlagerungshöhen sind in Bild 1 in "rot" eingetragen. Danach ist zu erkennen, dass in dem Bereich, in dem der Tunnel die Schichten des Aalenium 2 durchfährt, die vorhandene Überlagerung den oben zu 120 m ermittelten Wert mit max. 280 m deutlich überschreitet. Es war deshalb hier mit druckhaften Verhältnissen zu rechnen.

Maßgebend sind dabei die Tonsteinzwischenlagen ZOP und ZPU, die zwischen den Sandsteinschichten ODS, PS und UDS im Aalenium 2 eingelagert sind (Bild 1). Die in Bild 2 exemplarisch dargestellten Fotos der Kerne aus dem ZOP und ZPU, die im Zuge der Vorerkundung gewonnen wurden, lassen auf eine vergleichsweise geringe Festigkeit der Tonsteinzwischenlagen schließen. Vor diesem Hintergrund wurde der ca. 900 m lange Tunnelabschnitt im Aalenium 2 in der Ausschreibung als druckhaft beschrieben (Bild 1).



Bohrung BK 22/6 GM



Bild 2: Vorerkundung, Kernfotos aus den Tonsteinzwischenlagen des Aalenium 2

Beim Hohlraumbau in druckhaften Gebirgsverhältnissen treten infolge des Überschreitens der Gesteinsfestigkeit Spannungumlagerungen und Verformungen im Baugrund auf, die zu einer starken Beanspruchung der Sicherungsmittel führen können. Ein steifer Ausbau lässt sich unter solchen Verhältnissen i. d. R. nicht wirtschaftlich bemessen. Eine unzureichend dimensionierte Sicherung kann andererseits zum Verlust der Standsicherheit des Hohlraums führen (Bild 3, links).



Längsschlitze mit Stauchelementen

Quelle: Bochumer Eisenhütte Heintzmann

Bild 3: Druckhaftes Gebirge und nachgiebiger Ausbau

In der Praxis wird daher im druckhaften Gebirge ein nachgiebiger Ausbau verwendet, der kontrolliert radiale Verschiebungen der Ausbruchlaibung vor dem Ringschluss der Schale zulässt und dadurch zur Ausbildung eines tragenden Gewölbes im Untergrund führt. Nach dem Ringschluss können die dann noch auf den Ausbau einwirkenden Lasten schadlos aufgenommen werden. Ein solcher nachgiebiger Ausbau mit Längsschlitz, in denen Stauchelemente vorgesehen sind, wurde für das Auffahren des Tunnelabschnitts im Aalenium 2 geplant (Bild 3, rechts). Der maschinelle Vortrieb wurde in der Ausschreibung auf den Tunnelabschnitt im Aalenium 1 vom Portal bis Bau-km 42,1 beschränkt.

2. Erkundungsbauwerk

2.1 Lage und Ausbau

Mit dem Beginn der Ausführungsplanung und dem Bau wurde das Bestreben der ausführenden ARGE Tunnel Alaufstieg (ATA) deutlich, den maschinell aufzufahrenden Tunnelabschnitt möglichst über den Bau-km 42,1 hinaus zu verlängern. Es wurde daher mit dem Bauherrn und dem Tunnelbautechnischen Gutachter die Ausführung eines Erkundungsbauwerkes vereinbart, um die felsmechanischen Eigenschaften der Schichten des Aalenium 2 vertieft zu untersuchen und nach Möglichkeit zu einer günstigeren Einschätzung der Gebirgsverhältnisse zu gelangen. Das Erkundungsbauwerk wurde am Ende des konventionell aufgefahrenen Zwischenangriffstollens Umpfental angeordnet. Vom Fuß eines ca. 49 m tiefen Schachtes wurde hier ein 25 m langer Erkundungstollen in den Tonsteinzwischenlagen ZOP aufgefahren. Die Überdeckung des Stollens beträgt ca. 200 m und ist damit etwas geringer als die Überdeckung des Tunnelabschnitts, der in ca. 700 m Entfernung in den Schichten ZOP aufzufahren ist (Bild 4).

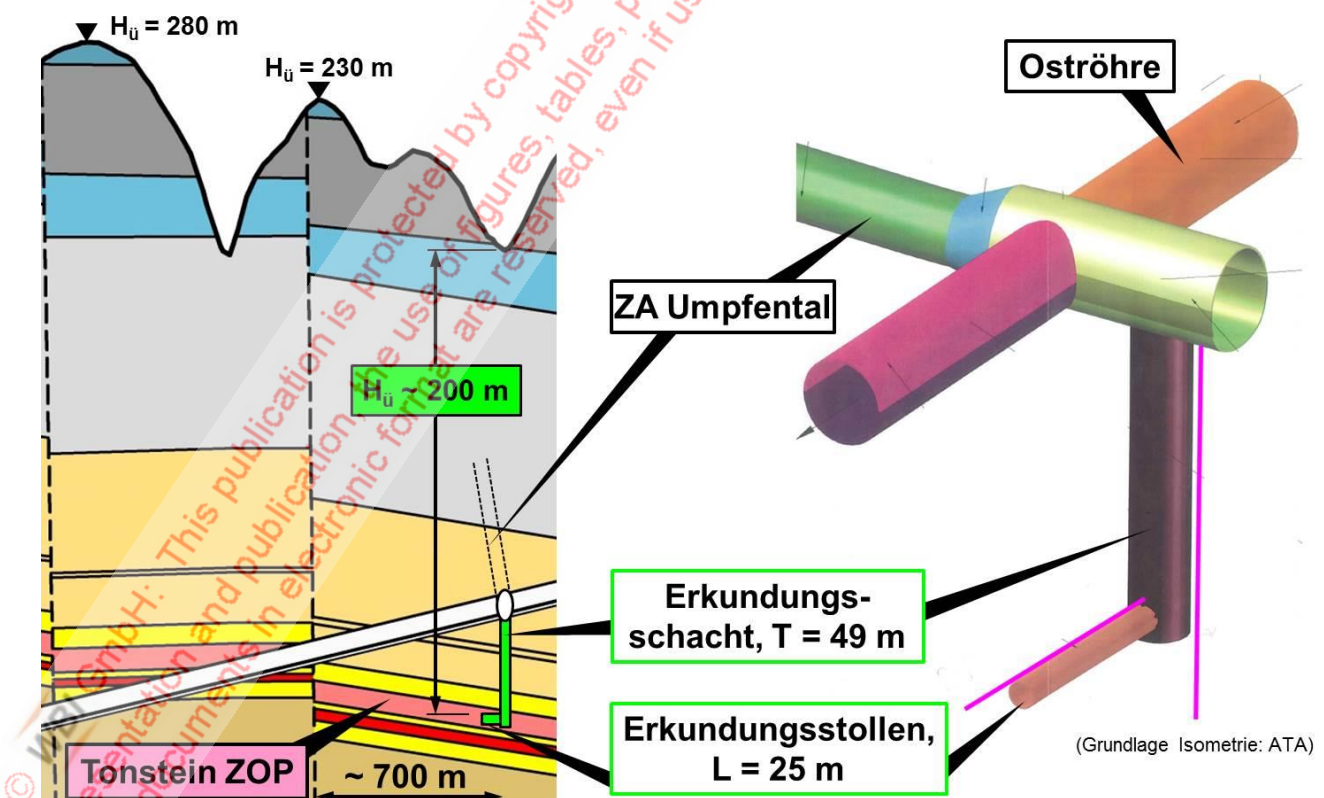


Bild 4: Lage Erkundungsschacht und -stollen

Auf der Grundlage rechnerischer Voruntersuchungen wurde entschieden, den Erkundungsstollen mit einem nachgiebigen Ausbau zu versehen. Das Abteufen des Schachtes und das Auffahren des Stollens wurden durch ein intensives Monitoring begleitet. Über den Bau des Erkundungsbauwerkes und den Umfang des Monitorings wird an anderer Stelle des vorliegenden Heftes berichtet. Wesentliche Ergebnisse des Monitorings werden nachfolgend dargestellt und erläutert.

2.2 Ergebnisse des Monitorings

2.2.1 Kartierungen

Beim Herstellen der Hohlräume wurde das Gebirge systematisch kartiert. Die Schichten ZOP des Aalenium 2 sind gekennzeichnet durch einen Wechsel von dunklen Tonsteinen und eingelagerten dünnen Sandsteinbänkchen und -linsen. Die Schichtung ist näherungsweise horizontal ausgebildet, kleinräumig sind auch Schichtverbiegungen vorhanden (Bild 5). Im Zuge der Erkundungen und deren Interpretation konnte festgestellt werden, dass die Sandsteinbänkchen eine bewehrende und verstärkende Wirkung für die Tonsteine haben.



Bild 5: Kernfotos aus der Tonsteinzwischenlage ZOP

2.2.2 Verformbarkeit

Im Rahmen von Dilatometerversuchen wurde die Verformbarkeit der Tonsteinzwischenlagen ZOP und ZPU gemessen. Im ZOP wurden dabei für die horizontale Richtung in 4 Versuchen Werte zwischen $E_{\text{horz.}} = 2.000$ und 4.000 MPa bestimmt. Im ZPU wurden in 5 Versuchen Werte von $E_{\text{horz.}} = 100$ bis 2.500 MPa gemessen. Für die vertikale Richtung wurde im ZOP in einem Versuch ein Wert von ca. $E_{\text{vert.}} = 3.000$ MPa ermittelt (Bild 6).

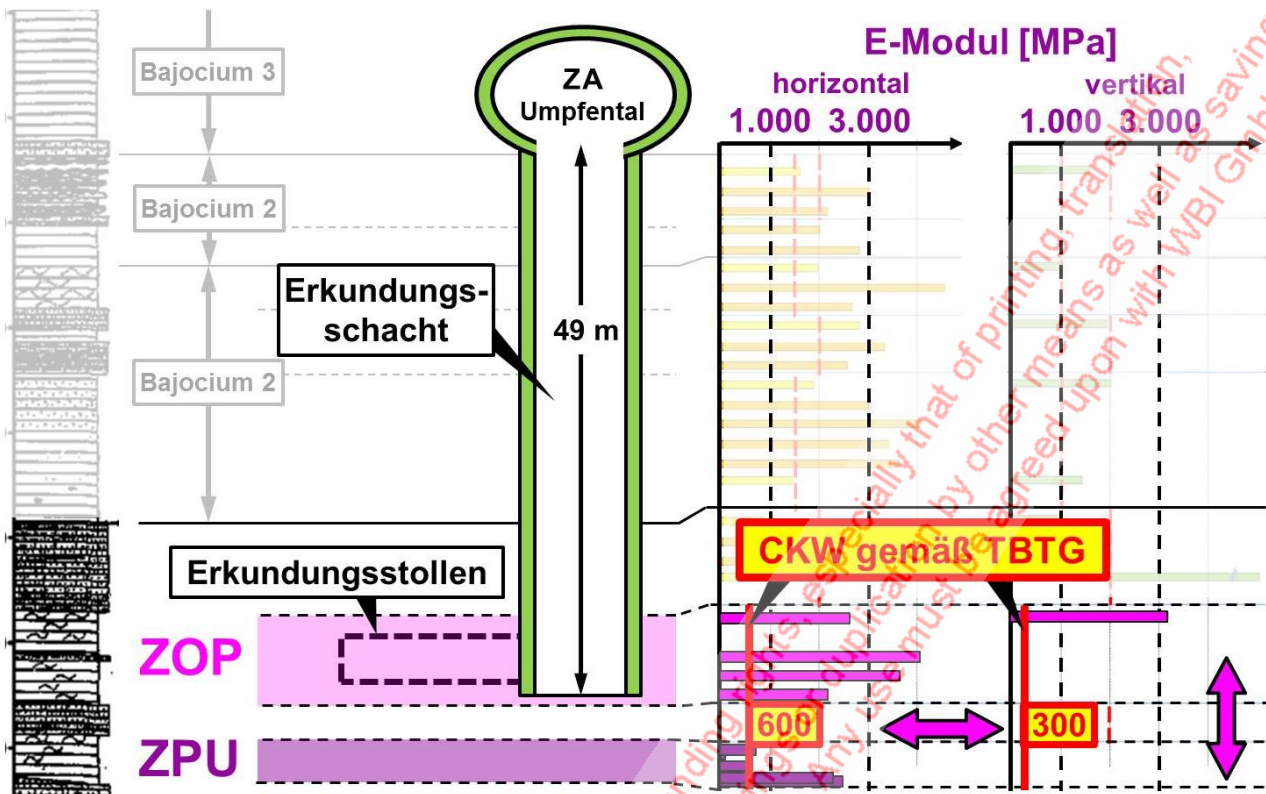


Bild 6: Ergebnisse der Dilatometerversuche im Aalenium 2

Die charakteristischen Werte des E-Moduls betragen nach den Ergebnissen der Vorerkundung $E_{\text{horz.}} = 600 \text{ MPa}$ und $E_{\text{vert.}} = 300 \text{ MPa}$. In den Feldversuchen aus dem Erkundungsschacht wurde somit im Vergleich zur Vorerkundung eine geringere Verformbarkeit des Gebirges bestimmt (Bild 6).

2.2.3 Festigkeit

An Gesteinsproben aus den Tonsteinschichten ZOP und ZPU wurde die einaxiale Druckfestigkeit gemessen. Dabei konnte an Kernen, die aus vertikalen Bohrungen gewonnen wurden, die im Zuge der Vorerkundung ermittelte einaxiale Druckfestigkeit von 3 MPa bestätigt werden (Bild 7, linkes Diagramm).

Aus horizontalen Bohrungen wurden zusätzliche Kernproben entnommen und im Laborversuch untersucht. Die Schichten verliefen in diesen Proben parallel zur Belastungsrichtung. Es zeigte sich, dass die entlang der Schichtung eingelagerten Sandsteinbänke zu einer Erhöhung der Festigkeit der Proben führten und dadurch etwas größere Werte von i. M. ca. 6 MPa gemessen werden konnten (Bild 7, rechtes Diagramm). Die verstärkende Wirkung der Sandsteine konnte im Rahmen von 3D FE-Berechnungen, in denen die Anteile und die Orientierung der Ton- und Sandsteine variiert wurden, plausibel nachvollzogen werden.

Neben den einaxialen Druckversuchen wurden auch dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben aus den Tonsteinschichten ZOP und ZPU durchgeführt. Die in den einaxialen Versuchen gemessenen Festigkeiten konnten dadurch bestätigt werden. Darüber hinaus wurde mit Hilfe dieser Versuche die Restfestigkeit der Gesteine untersucht. Nach den Versuchsergebnissen beträgt diese etwa 30 bis 50 % der Ausgangsfestigkeit.

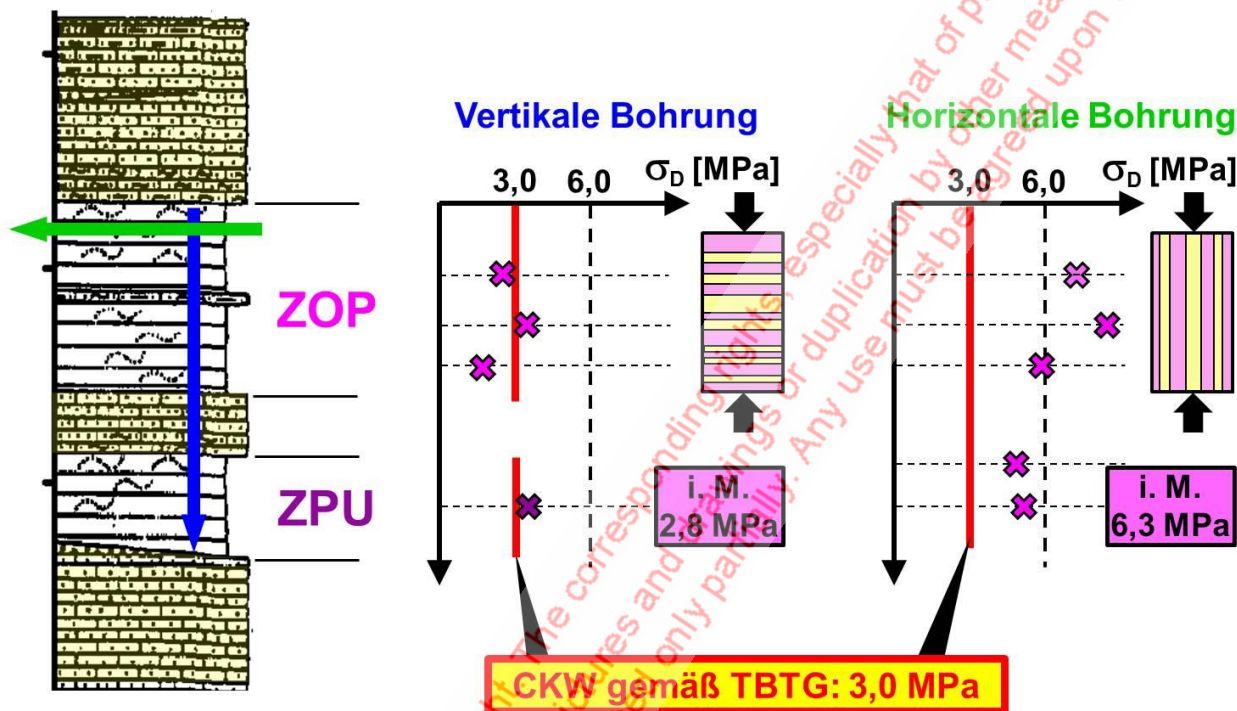


Bild 7: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche an Proben aus dem ZOP/ZPU

2.2.4 Schichtung

Neben der Verformbarkeit des Gebirges und der Festigkeit des Gesteins haben die Trennflächen einen wesentlichen Einfluss auf das Spannungs- und Verformungsverhalten des Fels. Daher wurden die Eigenschaften der Trennflächen im Rahmen der Erkundungen ebenfalls untersucht. Anhand der gewonnenen Bohrkerns und der Kartierungen konnte festgestellt werden, dass in den Tonsteinen horizontale ebene und glatte Schichtfugen ausgebildet sind, die die Scherfestigkeit des Gebirges parallel zur Schichtung signifikant herabsetzen (Bild 8). Aufgrund des vergleichsweise geringen gegenseitigen Abstandes dieser Trennflächen sind sie für das Tragverhalten des Fels beim Auffahren des Tunnels wichtig.



Bild 8: Horizontale Schichtfuge im ZOP

3. Interpretation

3.1 Rückrechnung Erkundungsbauwerk

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Feld- und Laborversuche wurden die beim Abteufen des Schachtes und beim Auffahren des Erkundungsstollens gemessenen Verschiebungen und Spannungen rechnerisch interpretiert. Dazu wurde zunächst ein räumliches FE-Netz generiert, in dem - unter Ausnutzung der vertikalen Symmetrieebene - sowohl der Schacht als auch der Erkundungsstollen mit ihren tatsächlichen Abmessungen nachgebildet wurden. Der Erkundungsstollen wurde, entsprechend den in situ eingebauten Sicherungsmitteln, auf den ersten 5 m Länge mit einer 30 cm dicken steifen Spritzbetonschale simuliert. Der anschließende 20 m lange Abschnitt wurde mit einem geschlitzten Ausbau und 20 cm dicker Spritzbetonschale nachgebildet. In den Längsfugen, die in der Sohle, der Firste und den beiden Ulmen angeordnet wurden, wurde entsprechend der Arbeitslinie der verwendeten Stauchelemente eine Stützlast von 200 kN/m berücksichtigt. Der E-Modul des Spritzbetons wurde mit einem Wert von $E = 5.000 \text{ MPa}$ angenommen (Bild 9).

In den Berechnungen wurden die Verformbarkeit des Gebirges, die Festigkeit des Gesteins, die Scherparameter der Trennflächen und der Primärspannungszustand variiert. Die errechneten Verschiebungen der Ausbruchlaibung und die Spannungen in der Spritzbetonschale wurden jeweils den in situ gemessenen Werten gegenübergestellt. Es wurde schließlich eine Parameterkombination ermittelt, mit der die Messergebnisse rechnerisch gut nachvollzogen werden können. Im Bild 10 sind auf der linken Seite exemplarisch die im Querschnitt bei Stollenmeter STM14 gemessenen Verschiebungen der Spritzbeton-

schale dargestellt. Danach wurden Stauchungen im Bereich der Längsschlitz bis ca. 20 mm gemessen.

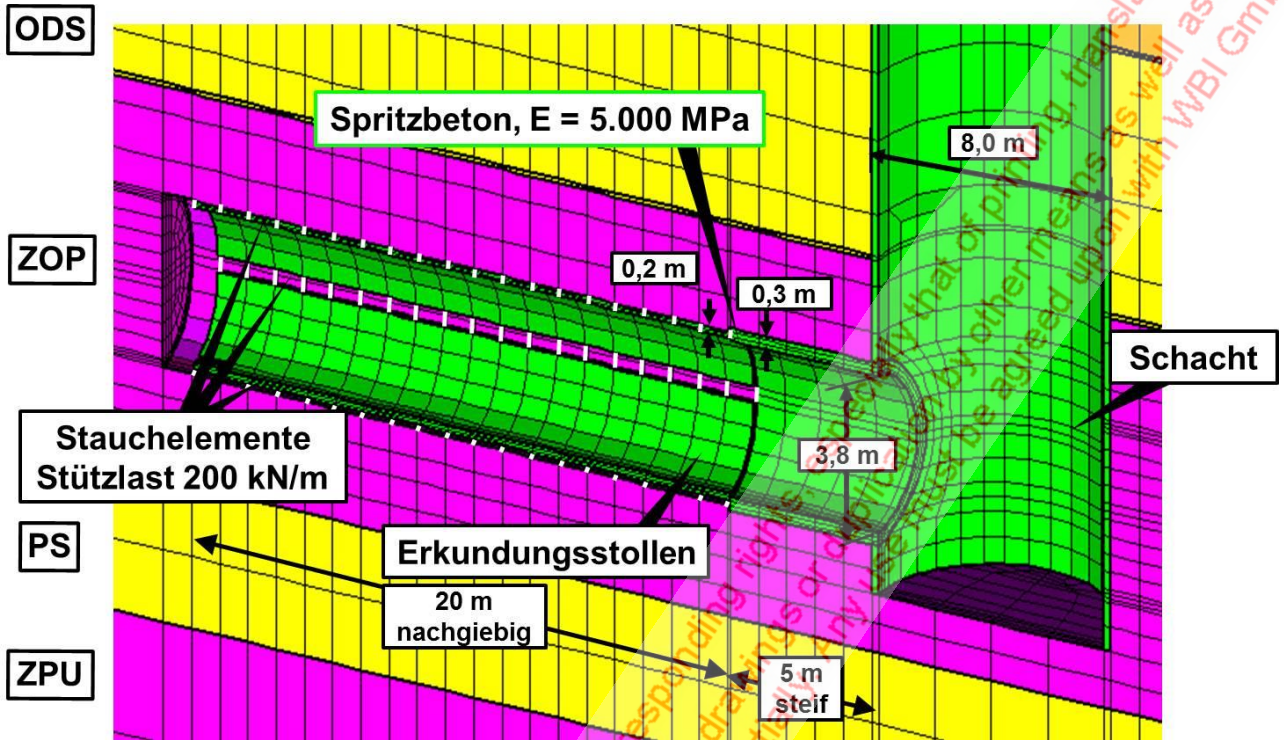


Bild 9: Erkundungsschacht und -stollen, Detail des FE-Netzes

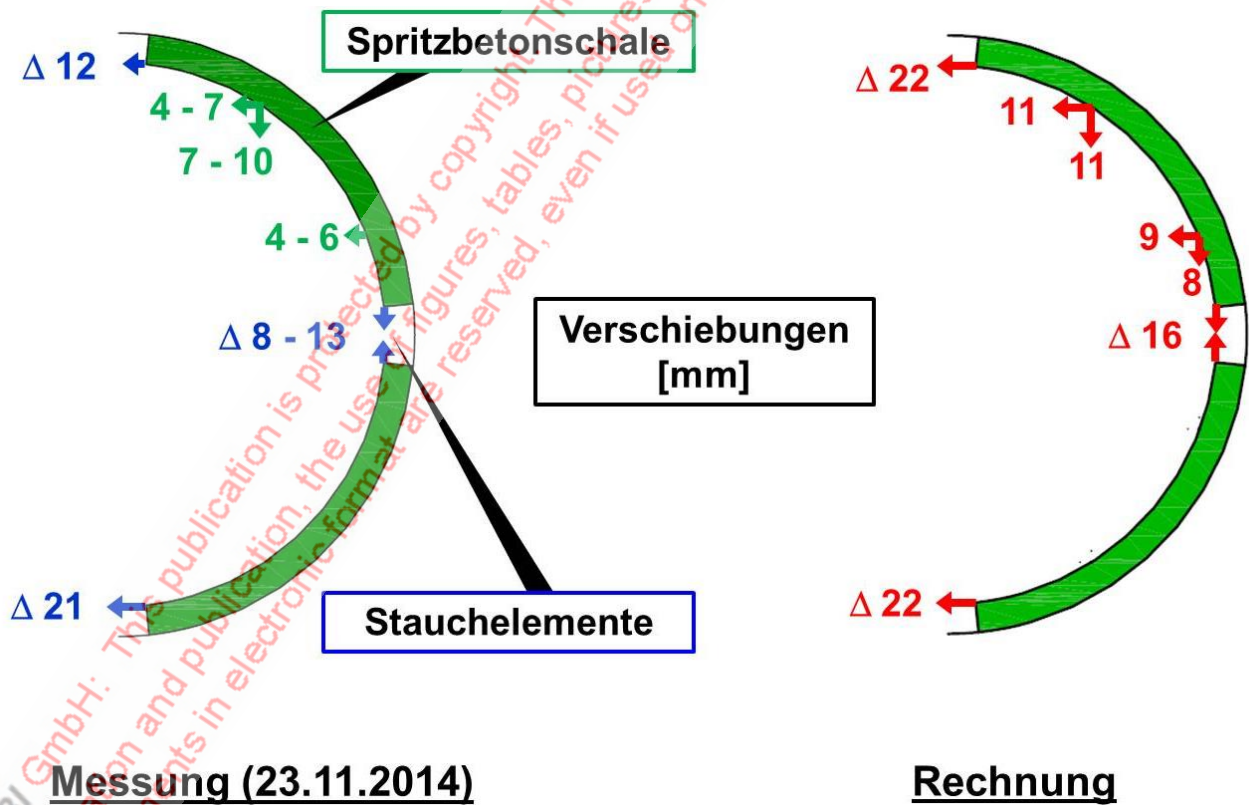
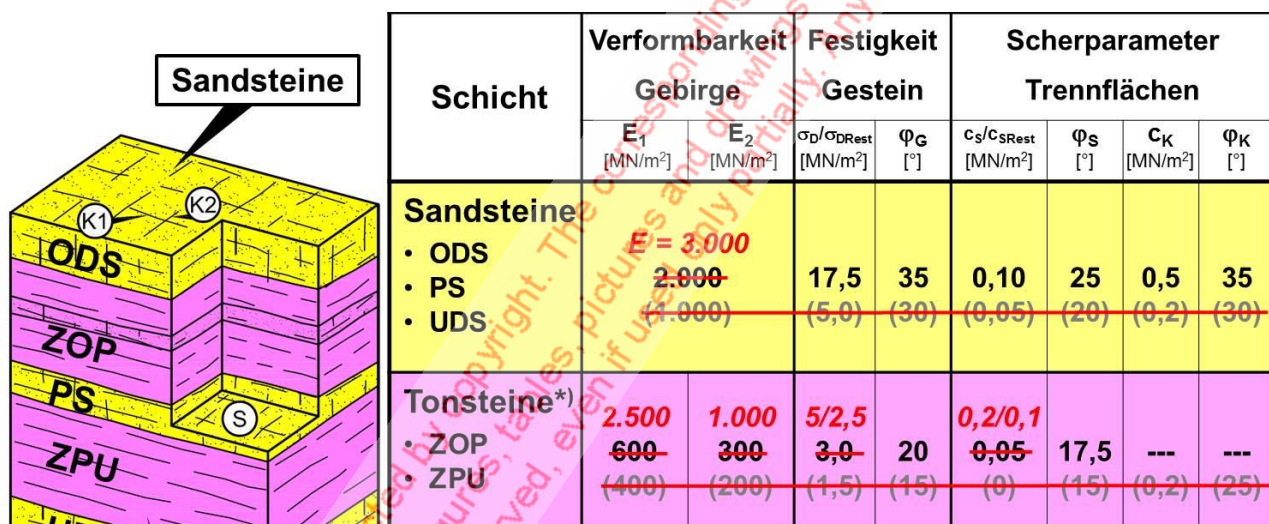


Bild 10: Verschiebungen der Spritzbetonschale des Erkundungstollens, Vergleich Messung - Rechnung

Das Rechenergebnis, das im Bild 10, rechts in "rot" eingetragen ist, bildet die gemessenen Verschiebungen mit guter Übereinstimmung ab. Die Spannungen, die in der nachgiebigen Spritzbetonsicherung des Erkundungsstollens gemessen wurden, betragen ca. 2 bis 3 MPa. Auch diese konnten mit Hilfe der räumlichen FE-Berechnungen gut nachvollzogen werden.

3.2 Fortschreibung Gefügemodell und felsmechanische Kennwerte

Auf der Grundlage des Monitorings im Erkundungsbauwerk und der Rückrechnung der Messwerte wurden das im Tunnelbautechnischen Gutachten beschriebene Gefügemodell und die felsmechanischen Kennwerte für das Aalenium 2 überprüft und fortgeschrieben. Danach kann für die Tonsteinzwischenlagen des Aalenium 2 auf den Ansatz von unteren Kennwerten verzichtet werden. Der E-Modul des Gebirges kann etwas größer angenommen werden. Die im Tunnelbautechnischen Gutachten beschriebenen erhöhten horizontalen Primärspannungen sind in den Tonsteinen des Aalenium 2 wirksam. Für die Sandsteine ergibt sich durch den Entfall der unteren Kennwerte ebenfalls eine gewisse Verschiebung in Richtung günstigerer Verhältnisse (Bild 11).



Fortgeschriebene Kennwerte:

- (Untere Kennwerte) entfallen
- E-Modul etwas größer
- Horizontalspannungen: $\sigma_{\text{horz.}} = \sigma_{\text{vert.}}$ gemäß Prognose

Bild 11: Gefügemodell des Aalenium 2 und felsmechanische Kennwerte

3.3 Überprüfung der Kennwerte im Tunnelmaßstab

Der fallende Vortrieb der Oströhre vom Zwischenangriff Umpfental in Richtung Aichelberg, hatte Ende November/Anfang Dezember 2014 nach Durchfahren einer Störung bei TM 695, die Schichten des Aalenium 2 erreicht. Die untere Hälfte des Kalottenquerschnitts kommt hier in den Tonsteinzwischenlagen ZOP zu liegen. Im oberen Querschnittsteil stehen die Sandsteine des Oberen Donzdorfer Sandsteins an (Bild 12). Vor dem Hintergrund der Bedeutung des Aalenium 2 für die optionale Verlängerung des maschinellen Vortriebs

wurde von den Beteiligten entschieden, den Kalottenvortrieb etwa 40 m in das Aalenium 2 fortzusetzen und die Daten des geotechnischen Monitorings zur Absicherung der Ergebnisse des Erkundungsbauwerks zusätzlich auszuwerten. Dieses Vorgehen wurde möglich, da die Schichten des al2 jenseits der Störungszone etwa 100 m früher angetroffen wurden als nach dem geologischen Modell prognostiziert. Die Sicherung des Kalottenquerschnitts im al2 erfolgte mit einer 40 cm dicken 2lagig bewehrten Spritzbetonschale ohne temporäres Sohlgewölbe. Zusätzlich wurden Spieße und Ortsbrustanker eingebaut (Bild 12).

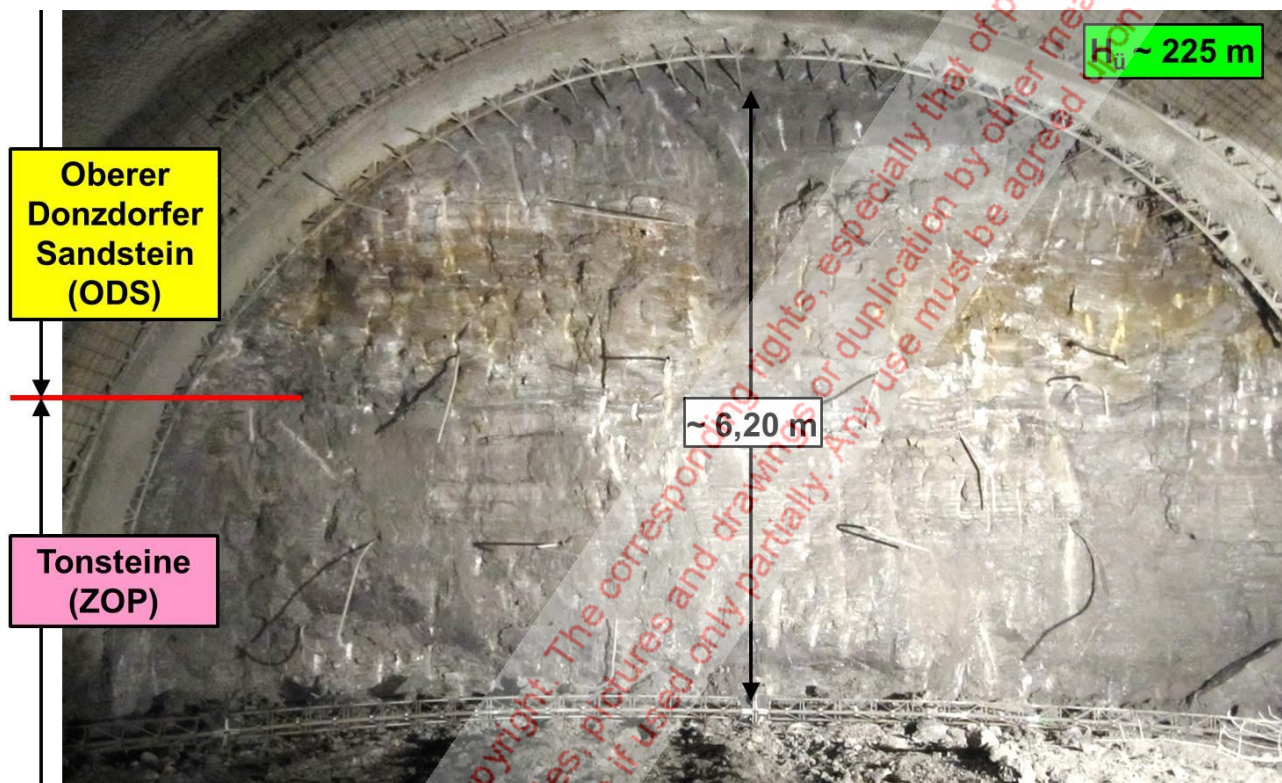


Bild 12: Oströhre, Foto der Ortsbrust bei TM 709,4

Der Vortrieb des Kalottenquerschnitts wurde mit Hilfe eines räumlichen FE-Modells (Bild 13) interpretiert. Diesem wurden die fortgeschriebenen felsmechanischen Kennwerte des Aalenium 2 gemäß Bild 11 zugrunde gelegt. In 3 Messquerschnitten wurden bis zum 14.12.2014 Firstsenkungen von 12 bis 32 mm gemessen. An den Ulmen traten bis zu diesem Zeitpunkt Verschiebungen von 24 bis 48 mm auf. Diese Verschiebungen konnten mit dem auf Basis des Erkundungsbauwerks kalibrierten Rechenmodell sehr gut nachvollzogen werden.

Die Schnittgrößen, die für die 40 cm dicke Spritzbetonschale bei der Nachrechnung ermittelt wurden, weisen eine hohe Beanspruchung der Schale aus. Die maximalen Spannungen entsprechen etwa der Rechenfestigkeit des Spritzbetons. Eine Bemessung der Schale nach DIN 1045-1 führt daher zu großen erforderlichen Bewehrungsgehalten bis maximal 44 cm²/m je Seite (Bild 14). Die in situ nur mit einer 2lagigen leichten Mattenbewehrung ausgeführte Spritzbetonschale, war rechnerisch somit deutlich überbeansprucht.

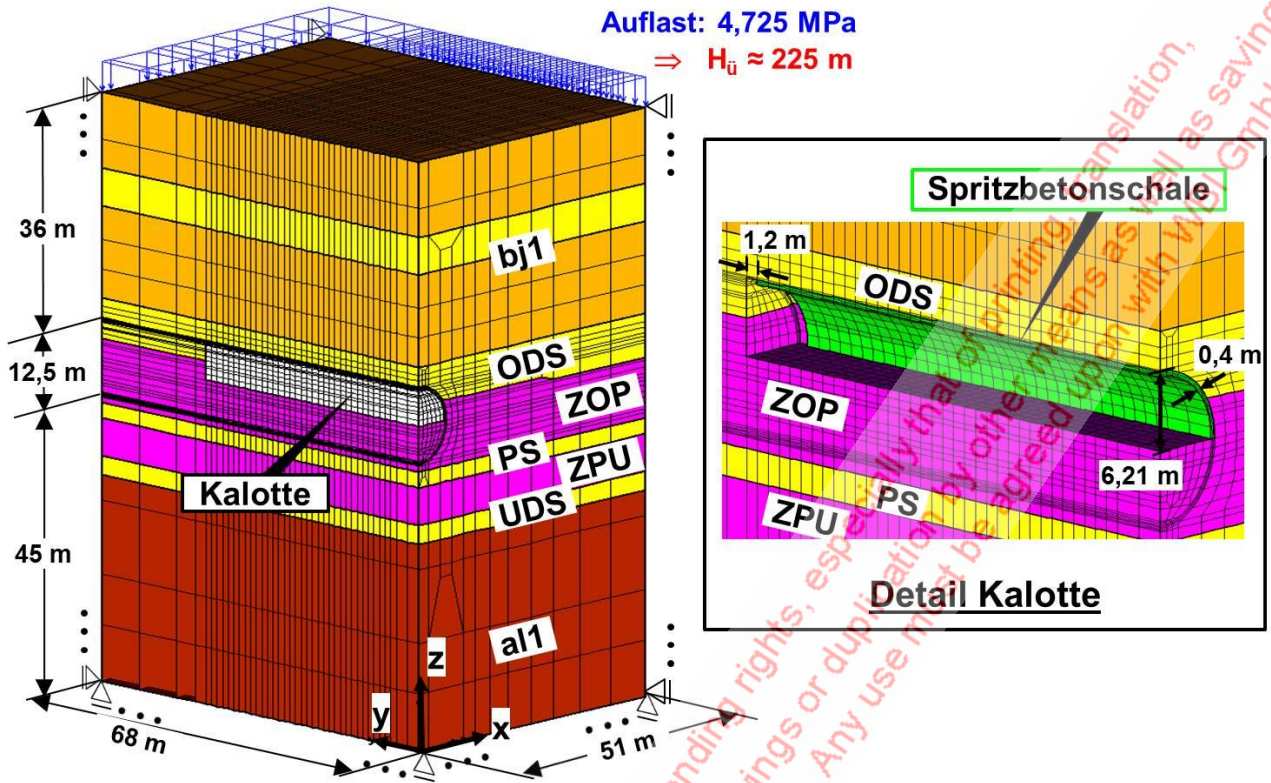


Bild 13: Oströhre, FE-Netz und Randbedingungen

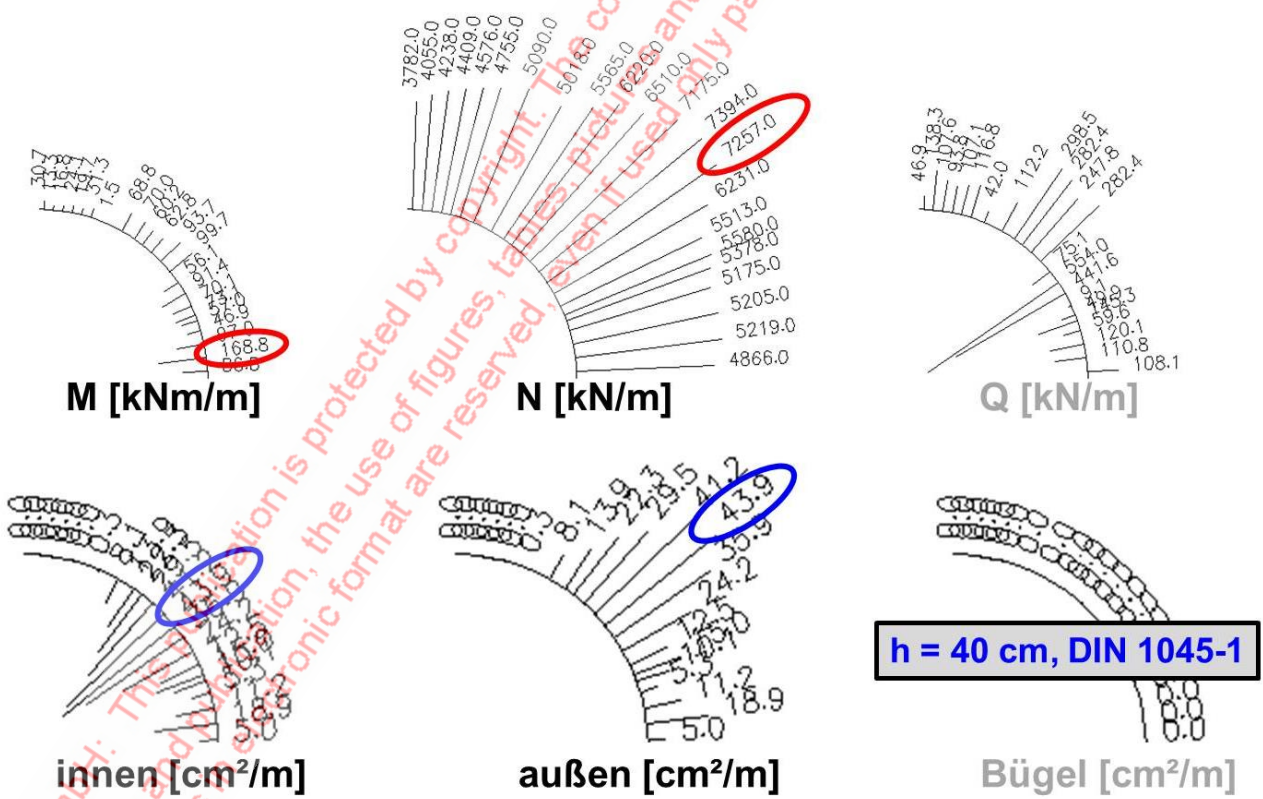


Bild 14: Kalotte der Oströhre, Schnittgrößen und Bemessung

Der Verlauf der Verschiebungen, die in den Messquerschnitten bei TM 703 und TM 719 gemessen wurden (Bild 15), lässt auf die große Beanspruchung der Schale schließen.

Auch eine Woche nach Einstellen des Vortriebs am 08.12.2014 traten noch deutliche Verschiebungszuwächse auf. Erst nachdem die Schale durch 20 cm zusätzlichen Spritzbeton verstärkt wurde und eine Nachankering ausgeführt worden war, kamen die Verschiebungen vor der Weihnachtspause zur Ruhe (Bild 15). Die Beobachtungen vor Ort bestätigen somit das Rechenmodell und damit die Fortschreibung der Kennwerte.

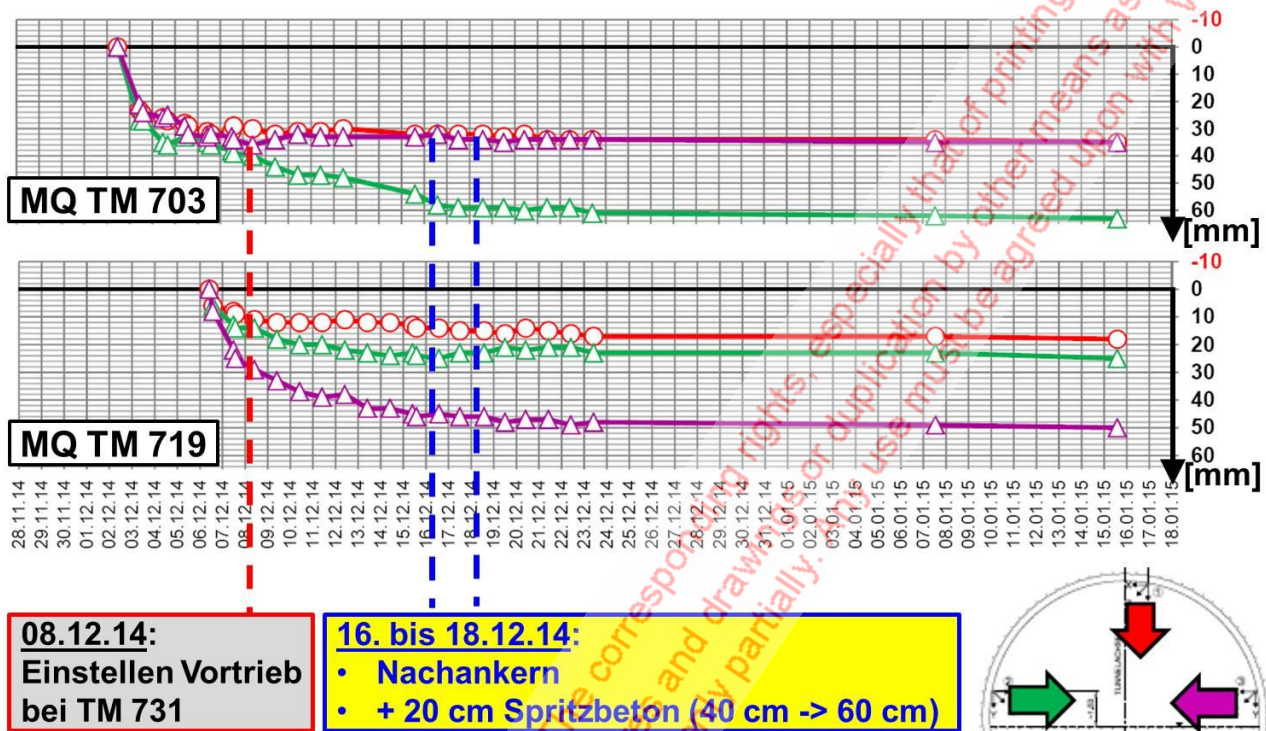


Bild 15: Nordvortrieb der Oströhre, Verschiebungen bei den Messquerschnitten TM 709 und TM 719

4. Schlussfolgerungen

Mit Hilfe der Ergebnisse des Erkundungsbauwerkes konnten das felsmechanische Modell und die Kennwerte des Aalenium 2 in Richtung günstigerer Verhältnisse fortgeschrieben werden. Die Fortschreibung konnte im Tunnelmaßstab überprüft und bestätigt werden. Damit liegt nun eine belastbare und abgesicherte Basis für die weiteren Planungsarbeiten zur angestrebten Verlängerung des maschinellen Tunnelvortriebs vor. Die ergänzend gewonnenen Erkenntnisse lassen erwarten, dass auch die Schichten des Aalenium 2 bei entsprechender Dimensionierung der Tübbingschale mit der TVM durchfahren werden können. Die Ausführungsplanung muss dies noch bestätigen.

Das vorliegende Beispiel des Boßlertunnels zeigt, welche Bedeutung die Erkundung der Gebirgsverhältnisse für die Planung und Ausführung von Tunnelbaumaßnahmen hat. Die Ausführung eines Erkundungsbauwerkes in der Vorerkundungsphase kann nach Meinung der Autoren dabei ein wertvolles Element darstellen, um Unsicherheiten für die Planung und den Bau signifikant zu reduzieren und den Weg für eine wirtschaftliche Lösung zu bereiten. Vor dem Hintergrund der Kosten kommt die Ausführung eines solchen Erkundungsbauwerkes insbesondere bei schwierigen Baugrundverhältnissen und großem Bauvolumen in Betracht.

Literatur

ATA: Ausführungsunterlagen zum Bau des Tunnels, des Zwischenangriffstollens Umpfental, des Erkundungsschachtes und des Erkundungstollens Umpfental. Verschiedene Planpakete mit verschiedenen Bearbeitungsständen. Eingang bis Dezember 2014.

ATA: PA 2.2, Los 2: Ergebnisse der baubegleitend durchgeführten geotechnischen Messungen in Tunnel, ZA-Stollen, Erkundungsschacht und Erkundungstollen: Verschiedene Daten und geotechnische Wochenberichte. Eingang bis Dezember 2014.

IGF, Institut für Gebirgsmechanik Leipzig GmbH: Gesteinsmechanische Untersuchungen - Projekt Alaufstieg, verschiedene Berichte und Zwischenberichte 2014. Eingang bis Dezember 2014.

WBI: NBS Wendlingen – Ulm, PFA 2.2, Alaufstieg, Boßler tunnel, Tunnelbautechnisches Gutachten, Oktober 2010.

Wittke, W.: Tunnelstatik, Grundlagen: Geotechnik in Forschung und Praxis. WBI-Print 4. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 1999.

Wittke, W.; Schmitt, D.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke, M.: Tragverhalten eines nachgiebigen Ausbaus im druckhaften Gebirge. Taschenbuch für den Tunnelbau 2012. Essen: VGE Verlag GmbH, 2012.

Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2014.