



Karstvorerkundung beim Bau des Tunnel Darmsheim, Baden-Württemberg

Dr. John Singer, AlpGeorisk, Unterschleißheim
Dr. Ralf Plinninger, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried
Joachim Dörner, Regierungspräsidium Stuttgart, Stuttgart
Tobias Priesack, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried
Christian Garber, geo.zt GmbH, Hall in Tirol

Der 2014/2015 aufgefahrenen Tunnel Darmsheim stellt das Kernstück der in Realisierung befindlichen Nordumfahrung Darmsheim der L1182 (Landkreis Böblingen) dar. Das Tunnelbauwerk besteht aus einer 460 m langen Hauptröhre und einem in der Westhälfte parallel dazu verlaufenden Rettungsstollen, der mittig in den Hauptstollen einmündet. Der gesamte bergmännische Vortrieb verläuft dabei innerhalb der Nodosus-Schichten, einer grundsätzlich verkarstungsfähigen Kalk-Mergel-Wechselfolge aus dem oberen Muschelkalk.

Bereits beim vorlaufenden NÖT-Vortrieb des Rettungsstollens wurden mehrere Karstspalten mit bis zu ca. 3 m Breite angefahren, die sich nachhaltig auf Ausbruch und Sicherung des Stollens auswirkten. Die laufende Auswertung der baubegleitenden ingenieurgeologischen Dokumentation zeigte, dass diese Strukturen an strukturgeologisch eindeutig vorgezeichnete Systeme gebunden waren. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte für den Vortrieb der Hauptröhre ein detailliertes Baugrundmodell inklusive Verkarstungsprognose erstellt und ein darauf abgestimmtes, baustellenpraktisches Vorauserkundungskonzept entwickelt werden. Mit Hilfe turnusmäßiger Vorausbohrungen, detaillierter geologischer Bohrdokumentationen und fallweiser Kamerabefahrungen mit einer kleinkalibrigen Bohrlochkamera konnten die Karstphänomene vor dem Anfahren bewertet werden und ein wirtschaftlicher und sicherer Vortriebsablauf sichergestellt werden.

1 Tunnel Darmsheim

Die Landesstraße L1182 bei Sindelfingen (Landkreis Böblingen) stellt eine wichtige Verbindungsstraße zwischen den Industriegebieten in Sindelfingen und Böblingen und dem direkten Umland dar und wird

nach einer Verkehrszählung von 2010 täglich von ca. 13.000 Fahrzeugen befahren. Insbesondere zu den Stoßzeiten morgens und nachmittags kommt es immer wieder zu einer Verkehrsüberbelastung im Bereich des Sindelfinger Stadtteils Darmsheim. Aus diesem Grund wurden bereits in den 1980er Jahren mit den Planungen für eine Nordumfahrung um den

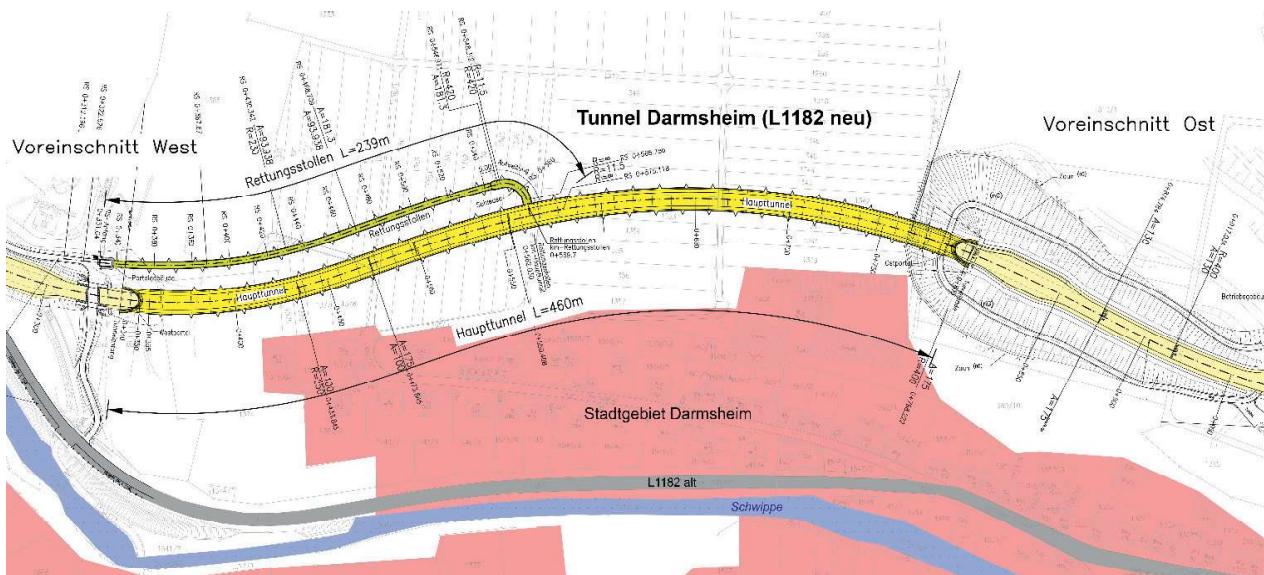


Abbildung 1-1: Übersichtsplan (Ausschnitt) der Nordumfahrung Darmsheim. Der neue Straßenverlauf der L1182 inklusive des neu errichteten Tunnels Darmsheim (gelb) führt im Norden am Stadtgebiet Darmsheim vorbei.

Stadtteil Darmsheim begonnen, die seit 2013 realisiert werden. Planungsgemäß wird die Nordumfahrung Darmsheim im Mai 2018 fertiggestellt werden. Die neue Streckenführung der L1182 beginnt nordwestlich von Darmsheim und führt nördlich von Darmsheim in einem Tunnel bis zur Kreisstraße K1004 (Abbildung 1-1).

Der Tunnel Darmsheim unterfährt dabei die plateauartige Erhebung der sog. „Wolfsgrube“ (456 m ü.NN) mit einer maximalen Überlagerung von rd. 20 m über Tunnelfirste. Das Tunnelbauwerk besteht aus einer 460 m langen Hauptröhre mit 2 Fahrstreifen sowie einem etwa in Tunnelmitte vom Haupttunnel abzweigenden Rettungsstollen. Der Rettungsstollen ist ca. 239 m lang und verläuft parallel zur Hauptröhre in Richtung Westportal.

Der Tunnelquerschnitt der Hauptröhre beträgt im Bankettbereich ca. 95 m² und im Bereich mit Sohlgewölbe ca. 118 m². Der Ausbruchquerschnitt des Rettungsstollens liegt bei nur ca. 13,5 m². Sowohl der Haupttunnel als auch Rettungsstollen wurden - bis auf kurze Strecken in offener Bauweise in den Portalbereichen - in geschlossener Bauweise nach den Prinzipien der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“ im konventionellen Bohr- und Sprengverfahren aufgefahren. Während der Rettungsstollen im Vollausbruch aufgefahren wurde, war im Haupttunnel eine Unterteilung des Querschnitts in Kalotte, Strosse und Sohle erforderlich.

Die Bauausführung erfolgte durch die Fa. Wayss & Freytag Ingenieurbau, München.

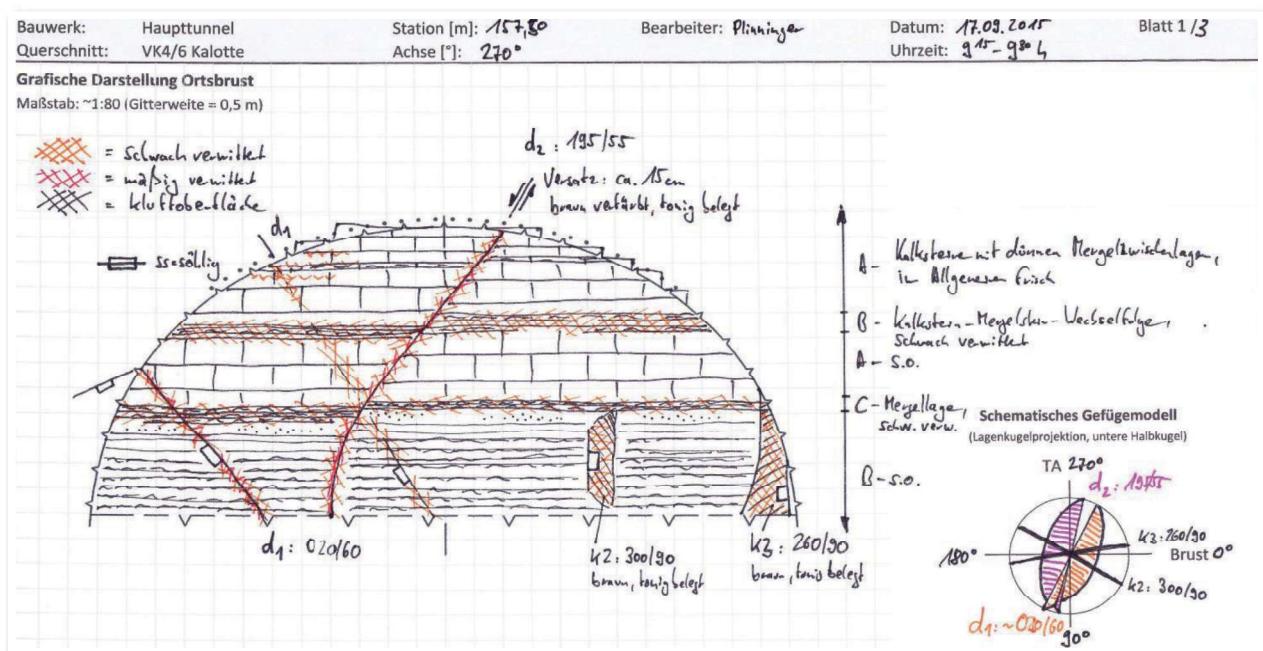


Abbildung 2-1: Beispiel für eine ingenieurgeologische Ortsbrustaufnahme in der Kalotte des Haupttunnels.

2 Baugeologische Dokumentation

Das Regierungspräsidium Stuttgart als Bauherr des Tunnels Darmsheim gab – auch aufgrund der zu erwartenden Karst-Problematik – eine baugeologische Dokumentation und Begleitung des Tunnelvortriebs in Auftrag, die vom Büro Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried, in den Jahren 2015 und 2016 ausgeführt wurde.

Aufgabenstellung war neben der (rückblickenden) Dokumentation der angetroffenen geologischen Verhältnisse auch die kontinuierliche Weiterentwicklung und Schärfung des Baugrundmodells, mit dem Ziel

einer optimierten geologischen und geotechnischen Prognose und eines darauf abgestimmten, möglichst effizienten und sicheren Vortriebs (siehe auch Plinninger et al. 2017).

Auf Grundlage der Ortsbrustdokumentation wurde laufend ein geologischer Längsschnitt entlang der Tunnelachse mitgeführt. Bereits nach vergleichbar kurzer Zeit konnte so zusammen mit den Erkenntnissen aus der Vorerkundung und den Aufschlüssen in den angrenzenden Kalksteinbrüchen ein detailliertes Baugrundmodell erarbeitet werden, welches fortlaufend auf Grundlage der jeweils neuen Ortsbrustdokumentation kontrolliert bzw. aktualisiert wurde.



Abbildung 2-1: Typische Ausbildung des Gebirges in den Nodosus-Schichten mit dunkelgrauen, unverwitterten Kalksteinlagen sowie hellgrau bis bräunlichen, mergeligen Zwischenlagen im Haupttunnel des Tunnels Darmstadt, hier TM 147,50 am 14.09.2015.

3 Geologie

3.1 Gesteine

Die angetroffenen Nodosus-Schichten des Oberen Muschelkalk sind zyklisch aus Wechselschichten von Tonmergelsteinen und Blaukalk- und Bruchschilllkalk und z. T. dolomitischem Tonmergel aufgebaut. In der Schichtfolge wechseln sich dünn- bis dickbankige, hellblaugraue, graugelbe, ockerfarbene bis graue Kalke und graue bis schwarze Tonsteine (Tonmergel) ab. Auf den Schichtflächen sind oft Eisen- und Calcitbeläge festzustellen. Im Vortrieb wurden nur vereinzelt Fossilien angetroffen, es handelte sich dabei im Wesentlichen um Spurenfossilien.

3.2 Trennflächengefüge

Die generell in etwa sölige sedimentäre Schichtung stellt das dominierende Gefügeelement der Muschelkalkabfolge dar. Die Mächtigkeiten der einzelnen Kalksteine und Mergelsteine umfasst Bänke von rd. 5 bis rd. 30 cm, im Mittel etwa 15 cm. Die Bankfugen sind insbesondere bei eingeschalteten Tonzwischenlagen oft glatt/wellig ausgebildet und besitzen eine hohe mechanische Wirksamkeit.

Des Weiteren wurde ein charakteristisches Kluftgefüge festgestellt. Bei den charakteristischen Maxima handelt es sich um folgende Systeme (siehe auch generalisiertes Gefügemodell in Abbildung 3-1, alle Angaben als Fallrichtungs- und Fallwinkelangaben nach E. CLAR):

- steilstehende Kluftsysteme (K1 – K3) mit einem mittleren Streichen um NNE-SSW (Schwerpunkt um 110/90 bzw. 290/90)
- ein mittelsteil nach NNE einfallendes Diagonalkluftsystem d1 (Schwerpunkt bei 015/65)
- und ein mittelsteil nach SSW einfallendes Diagonalkluftsystem d2 (Schwerpunkt bei 190/60)

Eine nennenswerte Anzahl der mittelsteil einfallenden Klüfte der Diagonalkluftsysteme d1 und d2 zeigte Versätze im Bereich weniger Zentimeter bis Dezimeter, bei denen es sich zumeist um Abschiebungen handelte.

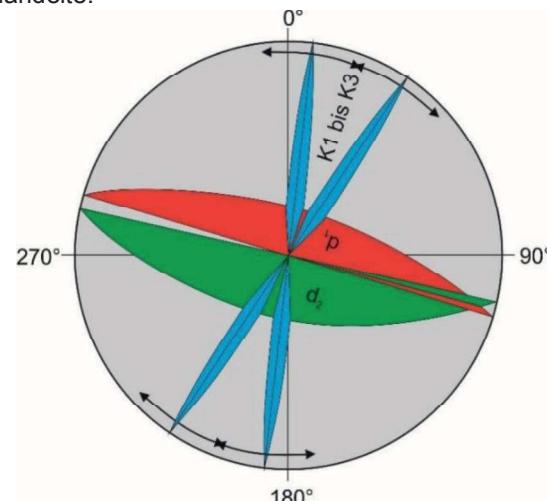


Abbildung 3-1: Gefügemodell der maßgeblichen Kluftsysteme (Zyklographische Flächendarstellung in der unteren Lagenkugel).

3.3 Verwitterung und Verkarstung

Der Verwitterungsgrad des Muschelkalkgebirges reicht von „mäßig verwittert“ bis „unverwittert“ im Sinne der DIN EN ISO 14689-1. Insgesamt konnte mit zunehmendem Vortrieb eine von den Portalbereichen zur Mitte des Tunnels hin abnehmende Verwitterung beobachtet werden. Die Verwitterung griff entlang der Trennflächen in den Gebirgsverband ein, was anhand auffälliger Farbkontraste zwischen unverwittertem (grauen) und verwittertem Gestein (bräunliche Farben) deutlich wurde (vgl. Abbildung 2-1).

Insbesondere die Klüfte der Diagonalkluftsysteme d₁ und d₂ zeichneten sich selbst in den Bereichen höchster Überlagerung und ansonsten unverwittertem Gebirgsverband durch eine meist signifikant erhöhte Verwitterung (Braunfärbung) sowie häufige Ton-Schluff-Bestege aus. Auch die wenigen, nennenswerten Verkarstungssphänomene waren strukturell an Klüfte dieser Systeme gebunden. Es wurden dabei sowohl karsterweiterte Klüfte, als auch Karstspalten angetroffen.



Abbildung 3-2: Karsterscheinungen im Rettungsstollen, TM 23,0 am 07.07.2015: Während die Muschelkalkfolge in der rechten unteren Hälften der Ortsbrust eine regelmäßige, söhlige Lagerung zeigt, weist sie in linker Ulme, Kämpfer und Firste ein flaches Einfallen nach rechts auf, mit einer deutlichen „Winkeldiskordanz“ an einer verwitterten und verlehmtten, mittelteil nach Links einfallenden Diagonalkluft.

Die auffälligste Karststruktur stellt ein bereits kurz nach Beginn des Vortriebs im Rettungsstollen zwischen ca. TM 22,0 und TM 38,0 schleifend angefahrenes System aus mehreren, miteinander verbundenen Karstspalten dar, die zu bindigem Lockergestein

verwitterte Residualsedimente mit z.T. breiiger Konsistenz sowie verkippte und stärker verwitterte Muschelkalkschollen umfasste (Abbildung 3-2).

Der genetische Zusammenhang zwischen Diagonalkluftsystemen, Störungen und Karststrukturen wurde bereits frühzeitig im Vortrieb offensichtlich und erleichterte die zielführende Vorerkundung und Prognose potenziell problematischer Strukturen.

4 Karstvorerkundung

Im Rettungsstollen, der mit Vorlauf zum Haupttunnel aufgefahren wurde, wurden bereits nach wenigen Metern bedeutende Karstphänomene angefahren (vgl. Abs. 3.3 und Abbildung 3-2), die eine Verringerung der Abschlagslänge und einen Wechsel in die Vortriebsklasse 7 (mit vorausseilender Sicherung durch Spieße) zur Folge hatte.

Für den weiteren Tunnelvortrieb – insbesondere den Vortrieb des Haupttunnels – wurde daher ein Vorerkundungskonzept entwickelt, das es ermöglichen sollte, mit hoher Wahrscheinlichkeit und ausreichendem Vorlauf kritische Karstphänomene vor dem Erreichen der jeweiligen Strukturen zu erkennen. Auf diese Art sollte eine sichere, aber gleichzeitig nicht unnötig konservativen Wahl der Vortriebsklassen ermöglicht werden.

4.1 Gefährdungsanalyse

Entscheidend für die Wahl der Vorerkundungsme- thode war eine geologische Bewertung der wahrscheinlichen Karstphänomene in Hinblick auf Ausbildung, Erstreckung und Orientierung sowie eine geotechnische Bewertung der möglichen Gefährdungs- szenarien für den Tunnelvortrieb bzw. das Tunnelbauwerk. Insbesondere für die im Zuge der NBS Nürnberg-Ingolstadt erstellten Bauwerken lagen hierzu zahlreiche Analysen und Erfahrungsberichte vor (u.a. Kirschke, 2002; Plinninger, et al, 2005).

An möglichen Szenarien war nach Kirschke (2002) z.B. das Eindringen von rolligem oder breiigem Material aus einem Karsthohlraum in den Tunnel, das Einbrechen der Tunnelsohle über einem offenen Karsthohlraum oder ein plötzlicher starker Wasser- zudrang aus Karsthöhlräumen nach Niederschlägen zu bewerten.

Für den Tunnel Darmsheim, der oberflächennah unter geringer Überdeckung oberhalb des Bergwasserspiegels aufgefahren wurde, war das Auftreten von größeren Mengen Karstwasser mangels eines ausreichend großen Einzugsgebietes grundsätzlich als sehr unwahrscheinlich anzusehen.

Aufgrund der Beobachtungen aus der ingenieurgeologischen Dokumentation wurde das Auftreten von an Diagonalklüfte gebundenen, karsterweiterten Klüften und Karstspalten mit Weiten im dm- bis m-Bereich als wahrscheinlichstes Karstphänomen betrachtet. Karsthöhlräume relevanter Dimension, die nicht an vordefinierte tektonische Strukturen gebunden sind, traten bis dahin und auch im weiteren Verlauf des Tunnelvortriebs nicht auf. Auch wenn bis dahin nur Karststrukturen beobachtet wurden, die stets mit bindigen Residualsedimenten und z.T. nachgebrochenem und verkippten Festgesteinsschollen gefüllt waren, konnte das Auftreten offener Hohlräume zu diesem Zeitpunkt nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Da der in etwa West-Ost-Verlaufende Vortrieb die mit einem Streichen von WNW-ESE und jeweils gegenläufigem Einfallen orientierten Diagonalklüfte schleifend anfuhr (vgl. Gefügemodell in Abbildung 3-1), war das initiale Antreffen von Karstphänomenen beim Vortrieb – je nach genauer Orientierung des Tunnels – jeweils im linken oder rechten Kämpfer bzw. an der linken oder rechten Fußpunkt der Kalotte am wahrscheinlichsten.

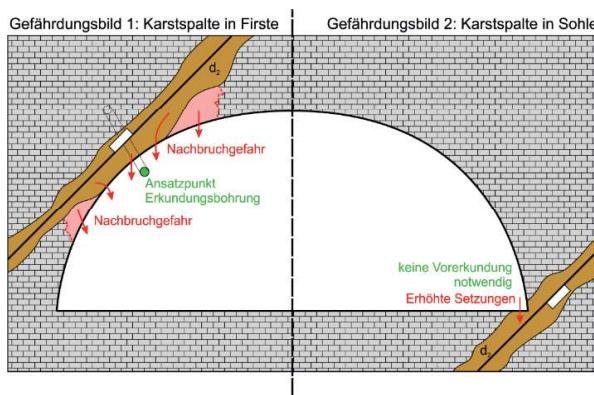


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der von den an Diagonalklüfte gebundenen Karstspalten ausgehenden Gefährdungsbilder. Hier dargestellt für die Diagonalkluft d2, wobei je nach Orientierung der Tunnelachse entweder das Gefährdungsbild 1 oder 2 wahrscheinlicher wird. Die Gefährdungsbilder der Diagonalkluft d1 sind genau spiegelverkehrt.

Daraus ergeben sich die in Abbildung 4-1 gezeigten Gefährdungsbilder: Es war zu erwarten, dass die Karststrukturen zunächst im linken oder rechten Kämpfer angefahren würden, was eine ggf. akute Nachbruchgefahr bedingen würde. Bei Antreffen der Strukturen im Bereich der linken oder rechten Kalottensohle waren je nach Dimension und Füllung der Spalte ggf. ein Absacken der Kalottensohle, bzw. hohe und asymmetrische Konvergenzen zu erwarten.

4.2 Vorerkundungsmethodik

Zur Karstvorerkundung stehen verschiedenste direkte und indirekte Verfahren zur Verfügung, deren Vor- und Nachteile bereits vielfach in der Fachliteratur diskutiert wurden. Thienert et al. (2016) beschreiben z.B. die Verwendung von geophysikalischen Messmethoden wie z.B. 3D-Bohrlochradar und kombinierte Mikroseismik und Mikrogravimetrie zur Hohlräumerkundung in verkarstetem Gebirge. Blumtritt et al. (2006) stellen den Nutzen optischer und akustischer Bohrlochscanner für eine quantitative Ermittlung von Hohlräumstrukturen dar.

Aufbauend auf diesen Erfahrungen und der projektspezifischen Gefährdungsanalyse konnte ein baustellenpraktisches und effizientes Vorerkundungskonzept entwickelt und umgesetzt werden, dass auf einer Kombination vorauselender Drehschlagbohrungen und im Bedarfsfall durchgeführter optischer Bohrlochinspektionen mittels einer Bohrlochkamera fußte.

4.2.1 Vorerkundungsbohrungen

Die Vorauserkundungsbohrungen wurden generell als Vollbohrungen $\varnothing 83$ mm mit dem Außenhammer des für die Sprenglochbohrungen eingesetzten Bohrwagens drehschlagend ausgeführt.

Im Haupttunnel wurden im Regelfall alle 10 Tunnelmeter zwei Bohrungen mit $L = 12$ m bei 10 Uhr (Kämpfer links) (vgl. Abbildung 4-1) und 14 Uhr (Kämpfer rechts) angesetzt. Die Überlappungslänge der Bohrungen betrug dementsprechend 2 Meter. Die Bohrungen wurden im Rettungsstollen. Im Rettungsstollen wurde im Regelfall eine Bohrung mit Standardlänge $L=12$ m ausgeführt. Der Bohrersatzpunkt befand sich auf Brusthöhe etwa in Tunnelachse. Auch hier wurde eine Überlappung von 2 Metern ausgeführt.

Die Bohrungen wurden mit rd. 10° ansteigend und leicht von der Tunnelachse abgeneigt gebohrt. Dies geschah zum einen um eine spätere optische Inspektion mittels Bohrlochkamera zu ermöglichen (Abfließen des Bohrwassers, besseres Spülen der Bohrung möglich) und zum anderen, um in Richtung der erwarteten Karstspalten zu bohren. Fallweise wurden bei Positivbefund / Verdachtsmomenten zusätzliche Bohrungen durch den betreuenden Geologen angeordnet.

Die Bohrungen wurden durch den vor Ort tätigen Ingenieurgeologen begleitet und dokumentiert. Dies erfolgte im entsprechenden Formblatt durch eine qualitative Bewertung von Bohrfortschritt, Kontinuität der Bohrung, Spülungsrücklauf sowie Eigenschaften des Spülungsrücklaufs und des enthaltenen Bohrkleins.



Abbildung 4-2: Beispiel für die Dokumentation des Bohrspülungsrücklaufs mittels Kübelproben.

Das bei den Bohrungen rücklaufende Spülwasser und Bohrklein wurde mittels Eimerproben spätestens nach 1 m Bohrfortschritt oder bei auffälligen Farbwechseln des Bohrwassers aufgefangen, hinsichtlich ihrer Zusammensetzung begutachtet und dokumentiert (Abbildung 4-2).

4.2.2 Optische Bohrlochinspektion

Wenn sich aus den Vorbohrungen Hinweise auf eine Verkarstung ergaben, wie z.B. auffällig hohe Bohrfortschritte, kombiniert mit Spülungsverlusten oder braun gefärbtem, feinkornreichem Bohrklein, wurde das Bohrloch nach Fertigstellung gründlich gespült und eine zusätzliche optische Inspektion durchgeführt. Bei dem hierbei eingesetzten System handelt es sich um handelsübliches, kleinkalibriges Kanal- bzw. Bohrlochinspektionssystem mit einer Länge von 30 m und einem Kamerakopf mit \varnothing 25 mm Durchmesser. Die von der Kamera erfassten Aufnahmen wurden auf einem TFT-Display vor Ort angezeigt und gleichzeitig auf einer Speicherkarte als Videosequenz aufgezeichnet (Abbildung 4-3).



Abbildung 4-3: Einsatz des Bohrlochinspektionssystems für eine Erkundungsbohrung im Haupttunnel.

5 Fazit

Die Kombination aus geologischer Dokumentation, Fortschreibung der Baugrundprognose und Bewertung geotechnischer Risikoszenarien stellt eine der Kernaufgaben der baubegleitenden Ingenieurgeologie dar. Das Beispiel der Karstvorerkundung am Tunnel Därmsheim zeigt, wie unter der Voraussetzung weitestgehend bekannter Strukturen eine effektive und baustellenpraktische Karstprognose und Vortriebssteuerung möglich sein kann. Mithilfe geologisch begleiteter Vorausbohrungen und Bohrlochkamera-Befahrungen konnten dabei sowohl unbekannte Karststrukturen vorauselend erkannt werden, als auch bereits bekannte Strukturen - wie eine bereits im Rettungsstollen angetroffene Karstspalte - weiterverfolgt werden. Auf diese Weise konnte der Vortriebsablauf optimal angepasst und ein auf die jeweilige Situation optimiertes Sicherungskonzept umgesetzt werden. Dabei ist aber stets zu berücksichtigen, dass die hier vorgestellte, projektspezifische Vorgehensweise sich sicherlich nicht ohne Weiteres auf andere, ggf. komplexere, Verkarstungsszenarien übertragen lässt.

Literaturverzeichnis

- Blumtritt, J., Heyn, T. & Crabeil, J.-P. (2006). *Erkundung von unterirdischen Hohlräumen in Karstgebieten im Altbergbau durch hochauflösende bohrlochgeophysikalische Messverfahren*. 5. Kolloquium Bauen in Boden und Fels.
- Kirschke, D. (2002). *Bautechnische Besonderheiten und Sicherheitsaspekte bei Tunnels im Karstgebirge*. Tunnelbau-Fachtagung 2002 der Tiefbau-Berufsgenossenschaft.
- Plinninger, R.J., Amadori, T. & Eckstaller, W. (2005): *Baubegleitende Karsterkundung und -sanierung in den Felseinschnitten des Bauloses Süd der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt*.- Felsbau, 23, 1: 41-47, Essen (Glückauf).
- Plinninger, R., Sommer, P. & Poscher, G. (2017). *On the role of the Engineering Geologist in the Construction Phase of Challenging Tunnel Projects*. Proceedings of the World Tunnel Congress 2017, Bergen, Norwegen.
- Thienert, Ch., Dombrowski, B., Leismann, F. & Markus, J. (2016). *Anforderungen an die Erkundung von Karst-Hohlräumen*, Tagungshandbuch zum 10. Kolloquium "Bauen in Boden und Fels" der TA Esslingen, 19. und 20. Januar 2016, S. 271-278 (Technische Akademie Esslingen).