

Bahnprojekt Stuttgart–Ulm: Erkundung und Sanierung von verkarstetem Baugrund der Albhochfläche für den Hochgeschwindigkeitsfahrweg

Dr. Stefan Kielbassa, DB Projekt Stuttgart–Ulm GmbH, Stuttgart

Die Neubaustrecke Stuttgart–Ulm quert die Schwäbische Alb mit den Abschnitten Alaufstieg, Albhochfläche und Alabstieg. Dabei ist die Albhochfläche überwiegend durch offene Streckenführung charakterisiert, während in den angrenzenden Hangabschnitten lange Tunnel dominieren. Diesen drei Bereichen gemeinsam ist eine ähnliche Geologie mit verkarstetem Weißjura-Kalkstein als häufigster Formation. Für die Herstellung eines standsicheren und gebrauchstauglichen Hochgeschwindigkeits-Fahrweges mit Fester Fahrbahn bedarf es hier insbesondere einer sorgfältigen baubegleitenden Karsterkundung. Anhand der Tunnel Widdeerstall (offene Bauweise) und Imberg (bergmännische Bauweise) sowie ausgesuchter Beispiele der offenen Strecke werden Ergebnisse zum Stand der flächendeckenden Karsterkundung für den Bahnkörper sowie Maßnahmen zu Karstsanierung vorgestellt. Ein vorläufiges Resümee wird als Momentaufnahme gezogen.

Übersicht

1. Einordnung in das Gesamtprojekt
2. Karst auf der schwäbischen Alb
3. Erkundungskonzept
4. Ausgewählte Ergebnisse
5. Sanierungsmaßnahmen
6. Vorläufiges Resümee

1. Einordnung in das Gesamtprojekt

Das Bahnprojekt Stuttgart–Ulm besteht aus den 2 Teilprojekten Stuttgart 21 (Neuordnung des Bahnknotens Stuttgart) und Neubaustrecke Wendlingen–Ulm (für Hochgeschwindigkeit 250km/h). Der Projektabschnitt „Albhochfläche“ erstreckt sich über mehr als 21 km und umfasst überwiegend Streckenführungen in Einschnitten und Dämmen, aber auch 4 kürzere Tunnel, die zum größten Teil in offener Bauweise errichtet werden (Bilder 1 und 2).

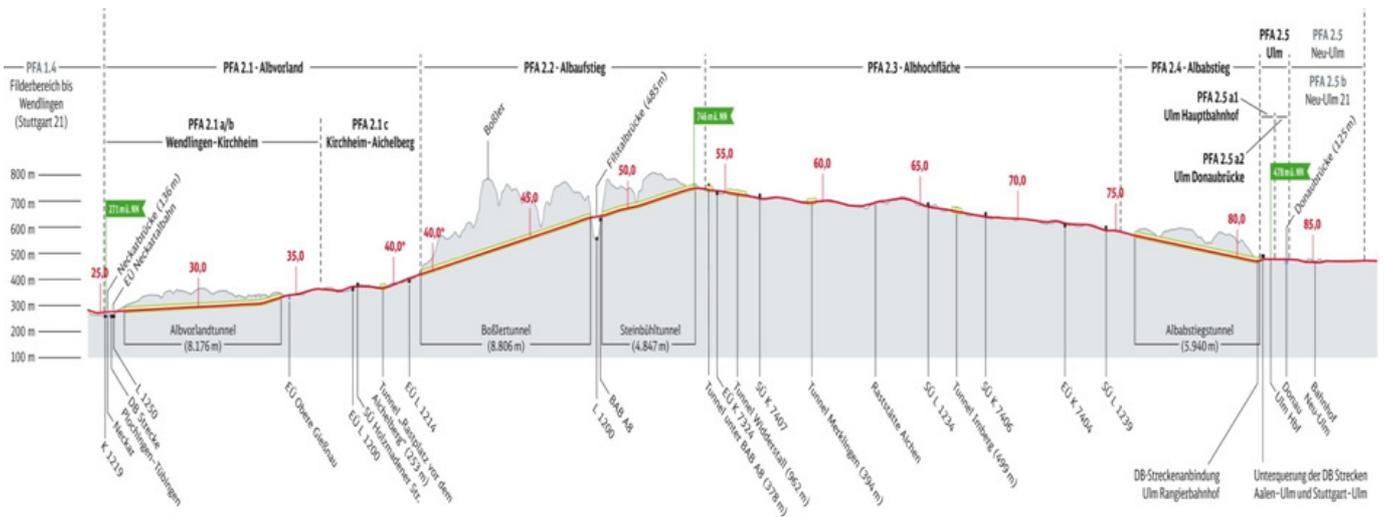


Bild 1: Höhenplan der NBS W-U

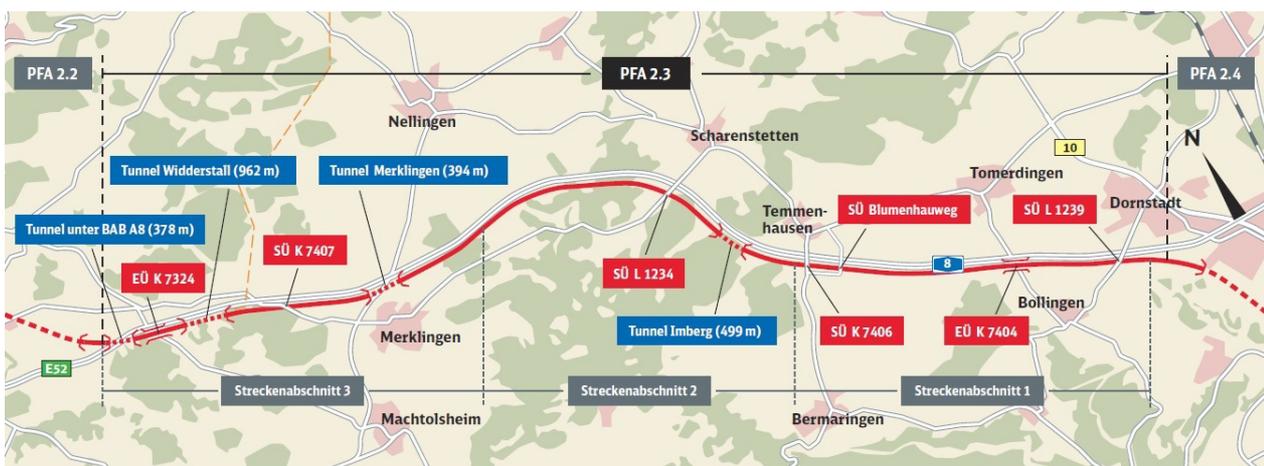


Bild 2: Übersichtskarte vom PFA 2.3

2. Karst auf der Schwäbischen Alb

Auf der schwäbischen Alb steht durchgehend Kalkstein als Baugrund an, teilweise zutage tretend, meist überlagert von geringmächtigen Lockergesteinsschichten, in tiefer liegenden Schichten eher als unverwitterter Massenkalk, oberflächennah eher als mehr oder weniger zerlegter bzw. verwitterter Fels. Kalkstein unterliegt bei Einwirkung von Wasser und Kohlendioxid ("saurer Regen") dem natürlichen Prozess der Verkarstung. In Trennflächen eindringendes Wasser zersetzt das Gestein, wodurch beständig an Größe gewinnende unterirdische Hohlräume entstehen. In standsicherer Umgebung können dabei in seltenen Fällen sehr große Hohlräume entstehen; typisch sind jedoch kleine bis mittlere Hohlräume, die offen stehen oder mit Lockergestein verfüllt sein können (Bild 3).

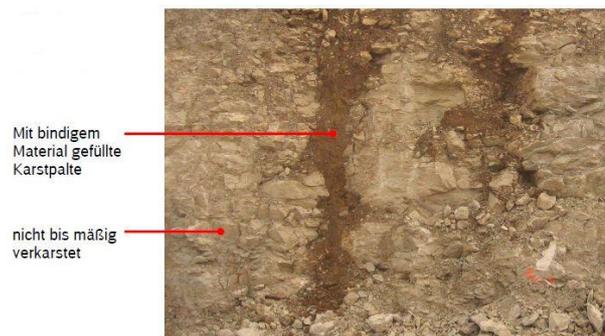


Bild 3: Karststrukturen am Tunnel Widderstall

3. Konzeption der baubegleitenden Erkundung

Bereits im Rahmen der Entwurfsplanung wurden Erkundungsbohrungen ab Geländeoberfläche systematisch ausgewertet und kategorisiert nach leicht, mäßig und stark verkarstet. Aus einer statistischen Hochrechnung wurde ermittelt, in welchem Umfang verschiedene Karst-szenarien zu erwarten sind. Charakteristisch ist dabei, dass man zwar diese statistische Verteilung prognostizieren kann, nicht jedoch die konkrete örtliche Ausprägung. Es muss also

damit gerechnet werden, dass bei der Bauausführung Karsthohlräume unterschiedlichster Größe und Form allerorten auftreten können.

Für die Ausführung bedarf es einer flächendeckenden, zuverlässigen und räumlich ortsscharfen Erkundung als Planungsgrundlage. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird dabei in zwei Stufen vorgegangen: 1. Identifizierung von Verdachtsflächen, 2. Gezielte tiefere Untersuchung der Verdachtsflächen.

Dies geschieht baubegleitend, nachdem die Gründungsebenen (Dammaufstandsflächen, bleibende Geländeeinschnitte, Baugruben für Tunnel in offener Bauweise usw.) hergestellt sind. Über die eingesetzten geophysikalischen Methoden der Seismik und Gravimetrie, ergänzt durch dynamische Vorbelastung des Baugrundes, wurde bereits an anderer Stelle ausführlich berichtet [1], [2].

Die Auswertung der Messergebnisse dient zur Identifizierung von Baugrundanomalien bis mindestens 10m Tiefe unter der Gründungsebene. Diese Verdachtsflächen werden im zweiten Schritt durch Rasterbohrungen genauer untersucht werden (Nacherkundung). Da die Bohrungen bezogen auf die Gründungsfläche grundsätzlich höhere Kosten verursachen, ist die zweistufige Vorgehensweise umso wirtschaftlicher, je kleiner der Flächenanteil von detektierten Anomalien ist.

4. Ausgewählte Ergebnisse

4.1 Tunnel Widderstall

Aufgrund seiner offenen Bauweise unterscheidet sich der Tunnel Widderstall bei der Karsterkundung nicht von offenen Streckenabschnitten. Aufgrund der größeren Tiefenlage der Grün-

derungsebene im Kalkstein zeigen sich typische Hohlräume Szenarien mäßig bis nicht verwitterten Gebirge jedoch geradezu lehrbuchhaft.

Bild 4 zeigt beispielhaft die Auswertung eines Baugrubenabschnitts vom Tunnel Widderstall. Die Flächenfärbungen stehen für Anomalieindikatoren 0 bis 5, die den Grad örtlicher Baugrundinhomogenitäten anzeigen. Anomalieindikatoren 0 und 1 (grün, blau) werden als frei von relevanten Karsterscheinungen anerkannt, ab Indikator 2 handelt es sich um Karstverdachtsflächen, die nachzuerkunden sind.

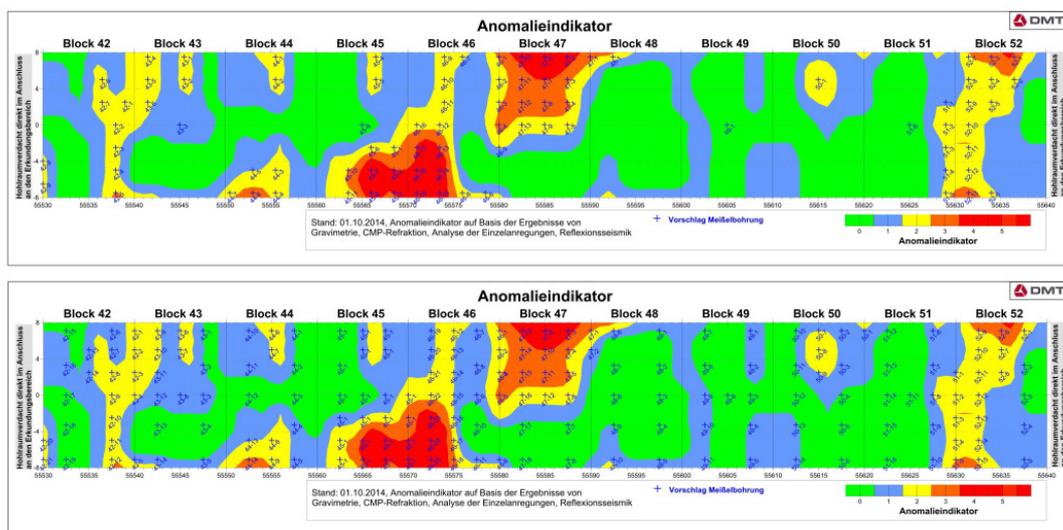


Bild 4: Auswertung Karsterkundungsergebnisse aus einem Abschnitt des Tunnels Widderstall

Bild 4 verdeutlicht außerdem vergleichend die Wirtschaftlichkeit der Vorgehensweise: für ein- und dasselbe Erkundungsfeld ist oben der reduzierte Nacherkundungsaufwand bei geophysikalischer Vorerkundung gegenüber der flächendeckenden Rasterbohrung (unten) als Vorerkundung ablesbar. Im oberen Bild sind nur die geophysikalisch detektierten Verdachtsflächen durch Rasterbohrungen 2,5x2,5m nacherkundet. Die untere Grafik zeigt das systematische Abbohren im Raster 5x5m als Vorerkundung mit anschließender Verdichtung auf 2,5x2,5m in den Verdachtsflächen. Bild 5 verdeutlicht die Erkundung mit den genannten Rastermaßen, die darauf abzielt, im gründungsnahen Tiefenbereich auch kleinere Hohlräume zu erfassen, während in größerer Tiefe maßgebliche Hohlräume größer sind.

Schnitt A-A

Mst.: 1:100

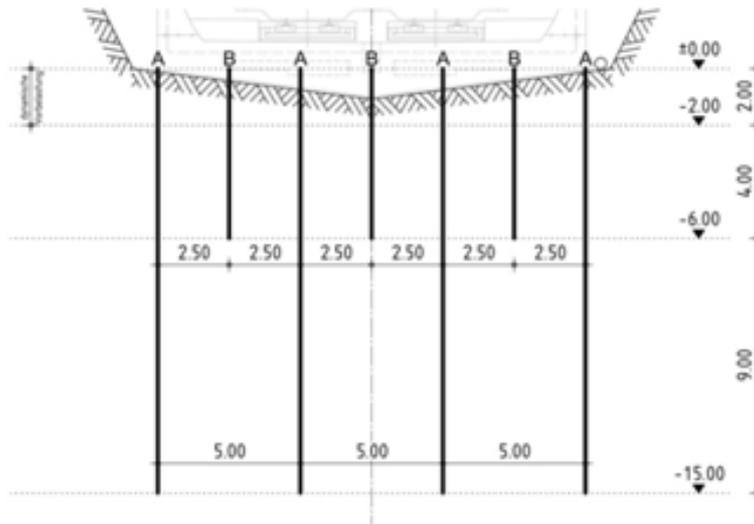


Bild 5: Rasterbohrungen zur Nacherkundung

4.2 Tunnel Imberg

Der Tunnel Imberg wird etwa zur Hälfte bergmännisch aufgeföhren und durch Abschnitte in offener Bauweise ergänzt. In Vorbereitung der Karsterkundung wurden Hohlräumezenarien definiert und unter Sicherheitsaspekten bewertet (Bild 6).

Fall	Code	Gefährdungspotential Vortrieb	Hohlraum kann geortet werden durch	Sanierung (Verfüllen/Einpressen)	Anpassung der Systemmankerung
1	K1A	hoch	Systemmankerung	ja	ja
2	U3A	gering	unwahrscheinlich	wenn geortet	nein
3	US1B	hoch	Vortrieb	ja	nein
4	S2C	mittel	Geophys. Erkundung	ja	nein
5	U1B	hoch	Systemmankerung	ja	ja
6	K1C	sehr hoch	Erkundung	ja	ja
7	U4D	sehr gering	nein	nein	nein
8	K2B	hoch	Systemmankerung	ja	ja
9	K3C	hoch	unwahrscheinlich	wenn geortet	nein
10	U2B	hoch	Systemmankerung	ja	ja
11	U4D	gering	unwahrscheinlich	wenn geortet	nein
12	US3C	mittel	Geophys. Erkundung	ja	nein
13	US1A	hoch	Geophys. Erkundung	ja	nein
14	US4D	mittel	Geophys. Erkundung	ja	nein
15	S2B	mittel	Geophys. Erkundung	ja	nein
16	U3C	gering	unwahrscheinlich	wenn geortet	nein

1-7 Karsthohlräume gemäß Ausschreibung
8-16 Ergänzende Karsthohlräume vom geotechnischen Sachverständigen, Email 08.05.2014

Erläuterung Code Karsthohlraum		
Lage	Abstand [m]	Größe [m,m³]
K Kalotte	1 0 < a < 2,5	A <1,5 (<2)
U Ulme	2 2,5 < a < 5	B <2,5 (<8)
US Übergang	3 5 < a < 10	C <5,0 (<65)
S Sohle	4 10 < a < 15	D <10 (<524)

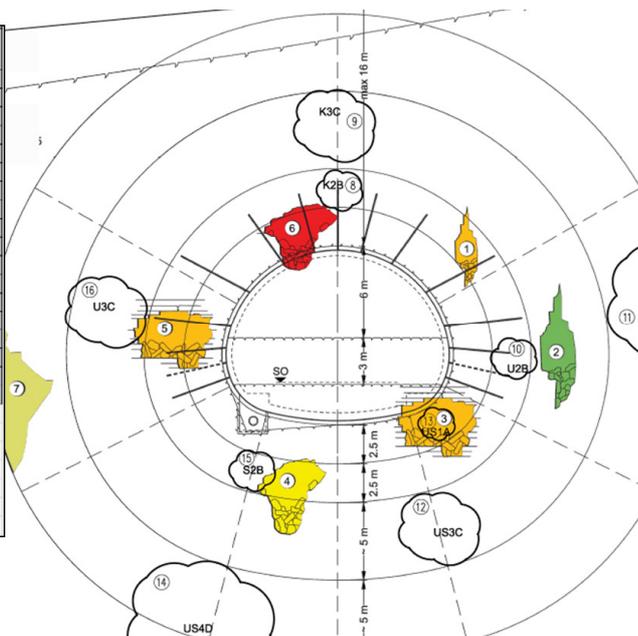


Bild 6: Hohlräumezenarien für den Tunnel Imberg und deren Bewertung nach Sicherheitsaspekten

Die Karsterkundung erfolgte zunächst während des Kalottenvortriebs durch Auswertung der für die Vortriebsarbeiten ohnehin erforderlichen Bohrungen von Anker- und Sprenglöchern, ergänzt durch vorausseilende Erkundungsbohrungen. Nach dem Kalottendurchschlag wurde der Vortrieb kurz unterbrochen, um auf der Kalottensohle bis in 8m Tiefe ein seismisches Messprogramm in Anlehnung an die Vorgehensweise in den offenen Streckenbereichen durchzuführen. Dies diente der Gewährleistung der Arbeitssicherheit bei den weiteren Teilausbrüchen und der Identifizierung ggf. erforderlicher erster Sanierungsmaßnahmen. Nach dem Ausbruch von Strosse und Sohle wurde das vollständige geophysikalische Messprogramm auf der endgültigen Tunnelsohle wiederholt, um Aufschluss über Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit im Endzustand zu gewinnen.

4.3 Offene Streckenabschnitte

Die beschriebenen Hohlrumbildungen sind auf die chemische Wirkung des kohlensauren Grundwassers im Weißjura-Gebirge zurückzuführen. Bei den vorgestellten Tunneln Widderstall und Imberg sowie bei tieferen Geländeeinschnitten ist diese Diagnose typisch. Bei den offenen Streckenabschnitten in Dammlage treten Hohlrumszenarien eher in den Hintergrund. Aufgrund der oberflächennahen Lage der Gründungsfläche trifft man hier oft Spätformen der Verkarstung (verfüllte oder verstürzte Hohlräume) an. Zusätzlich hat das Oberflächenwasser in erdgeschichtlichen Zeiträumen auch die damalige Felsoberfläche verändert, wobei neben dem chemischen Prozess der hydrolytischen Verwitterung auch die mechanische Zerstörungskraft des Oberflächenwassers, ggf. unterstützt durch Frost, mitwirkt. Örtlich ausgebildete Erdfälle, Dolinen und ehemalige Erosionsrinnen liegen heute versteckt unter überlagernden Sedimentschichten und werden oberflächlich gar nicht und in der Vorerkundung von der Geländeoberfläche aus bestenfalls zufällig gefunden. Die Geophysik deckt solche Abweichungen von dem prognostizierten schichtparallelen Baugrundaufbau zuverlässig

auf. Bild 7 zeigt ein solches Erkundungsergebnis, bei dem sogar Felsüberhänge im Weißjura erkennbar sind. Dagegen wurden relevante Hohlräume in diesem Bereich nur in nachrangiger Größenordnung festgestellt.

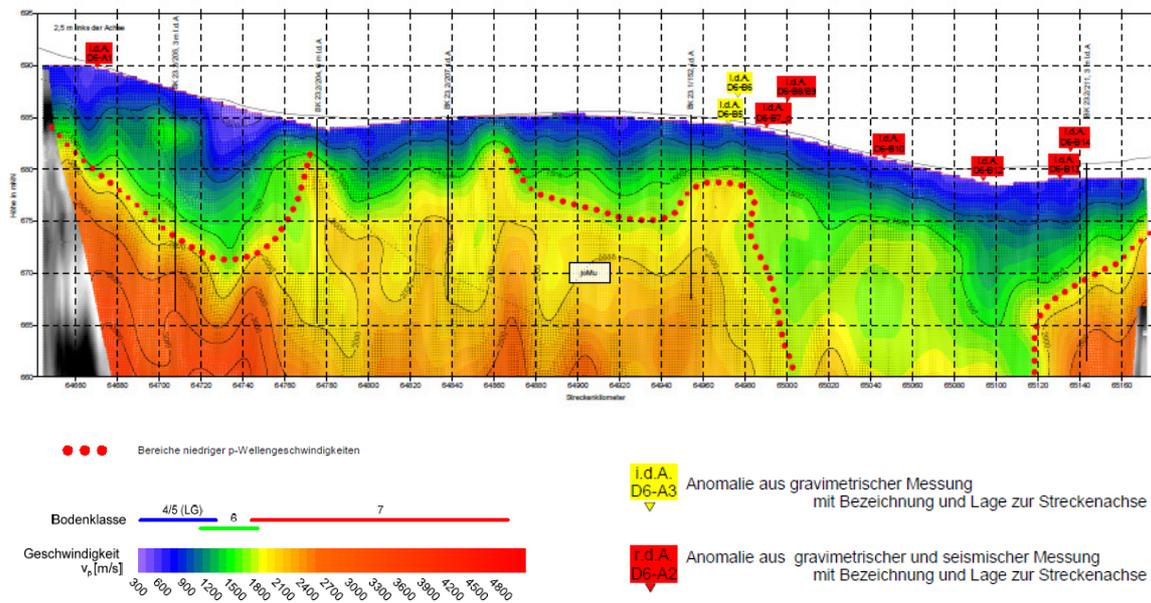


Bild 7: Ergebnis seismische Karsterkundung auf offener Strecke

5. Sanierungsmaßnahmen

Sanierungsmaßnahmen werden immer dann erforderlich, wenn einzeln stehende Hohlräume die Kriterien der tiefenabhängigen relevanten Hohlraumgröße erreichen. Darüber hinaus werden auch kleinere Hohlräume verfüllt, wenn sie in Ansammlungen auftreten. Bei allen Hohlraumverfüllungen wird das Verfüllkonzept mit der unteren Wasserbehörde abgestimmt, um zu verhindern, dass Grundwasserwegsamkeiten z.B. durch Beton unbeabsichtigt verschlossen werden. Bei Hohlräumen, die sich bis zur Gründungsebene erstrecken und somit während des Bauens zutage treten, erfolgt die Verfüllung mit filterstabil abgestuftem Mineralstoff. Hohlräume, die nicht zutage treten, werden durch Bohrungen gefüllt. Bei kleineren Hohlräumen sind dies Pumpöffnungen für das Einbringen von Mörtel. Bei größeren Hohlräumen kommt

auch das Aufbohren mit größeren Durchmessern infrage, um zunächst eine Auffüllung mit größeren Blöcken vorzunehmen. Bild 8 zeigt beispielhaft eine Hohlraumsanierung.

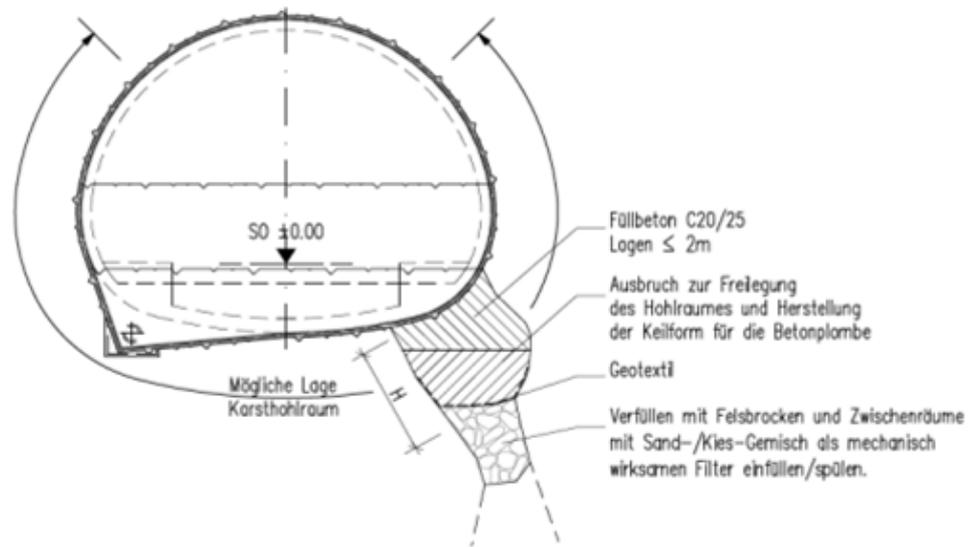


Bild 8: Beispiel einer Hohlraumsanierung im Tunnel Imberg

Sanierungen erheblichen Umfangs werden meist für oberflächennahe Grundungsflächen wie Dammaufstandsflächen erforderlich. Erdfälle, Dolinen und ehemalige Erosionsrinnen müssen entweder ausgeräumt werden (Bodenaustausch) oder ertüchtigt werden (Bindemittelverbesserung). Bei größeren Tiefen kommen auch Dammtiefgründungen oder Fahrwegtiefgründungen infrage.

6. Vorläufiges Resümee

Als Momentaufnahme Ende 2015 (ca. 85% erkundet) lässt sich folgendes feststellen:

Die Anzahl der erkundeten Karsthohlräume liegt über den Prognosen. In der weit überwiegenden Mehrzahl handelt es sich um kleinere Hohlräume, die im Sinne des Kriteriums der relevanten Hohlraumgröße offen bleiben dürfen oder sehr leicht zu sanieren sind. Mittlere Hohlraumgrößen wurden bisher deutlich seltener angetroffen als prognostiziert. Bisher wurde 1 größerer Hohlraum („Höhle“), in der Baugrubenböschung des Tunnels Widderstall, gefunden (Bild 9). „Mega-Hohlräume“ (vergl. Laichinger Tiefenhöhle) wurden bisher nicht gefunden.



Bild 9: Karsthöhle am Tunnel Widderstall

Schwerwiegende Sanierungsfälle sind bisher nicht durch Hohlräume verursacht, sondern durch örtliche Tieflage des Felshorizontes und damit einhergehenden unerwarteten Mächtigkeiten der überlagernden Sedimente. Dabei kann die Felsoberfläche nahezu senkrecht in Größenordnungen von Zehnermetern abfallen. Solche Situationen erfordern eine Anpassung des Gründungsentwurfs und besondere Überlegungen zum Umgang mit dem Steifigkeitssprung unter der Festen Fahrbahn.

Das beschriebene zweistufige Erkundungskonzept aus vorlaufender Geophysik und gezielter Nacherkundung durch Rasterbohrungen auf erkannten Verdachtsflächen ist technisch und wirtschaftlich erfolgreich.

Autor:

Dr. Stefan Kielbassa, DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH, Räpplenstr. 17, 70191 Stuttgart

Bilder:

Bild 1: Höhenplan der Neubaustrecke Wendlingen-Ulm

Bild 2: Übersichtskarte vom PFA 2.3

Bild 3: Karststrukturen am Tunnel Widderstall

Bild 4: Auswertung Karsterkundungsergebnisse aus einem Abschnitt des Tunnels Widderstall

Bild 5: Rasterbohrungen zur Nacherkundung

Bild 6: Hohlraumszenarien für den Tunnel Imberg und deren Bewertung nach Sicherheitsaspekten

Bild 7: Ergebnis seismische Karsterkundung auf offener Strecke

Bild 8: Beispiele einer Hohlraumsanierung im Tunnel Imberg

Bild 9: Karsthöhle am Tunnel Widderstall

Literatur:

[1] Kielbassa S.: *Projekt Stuttgart–Ulm, Besonderheiten des Bauens bei verkarsteten Baugrund: Albhochfläche, Albabstieg und Bahnhof Ulm*; Tagungsband des 21. Symposiums Felsmechanik und Tunnelbau, ISBN-Nr.: 978-3-946039-00-6 (Mai 2014), Seite 12-16.

[2] Kielbassa S., Prischmann F., Beer N.: *Karsterkundungs- und Sanierungsmaßnahmen für den Hochgeschwindigkeitsfahrweg auf der Schwäbischen Alb*; Geomechanics and Tunneling, Heft-Nr. 2, (April 2015), Seite 129-145.