BEITRAGSREIHE
PRAXIS UND TECHNIK

Tunnelbau im Karst - Erfahrungen vom Bau der Eisenbahn-hochgeschwindigkeitsstrecke Wuhan-Guangzhou in China

J. Holzhäuser (2017)

Mitteilungen der GEOTECHNIK SCHWEIZ, Frühjahrstagung am 18.05.2017, Olten
Heft Nr. 174, 2017, Seite 23 bis 28

Tunnelbau im Karst – Erfahrungen vom Bau der Eisenbahn-hochgeschwindigkeitsstrecke Wuhan-Guangzhou in China

1 Einleitung

Die rund 960 km lange Eisenbahnhochgeschwindigkeitsstrecke Wuhan-Guangzhou ist Bestandteil der für die Volksrepublik China wichtigen Nord-Süd-Achse Peking-Shenzhen/Hong Kong. Sie verbindet die am Fluss Yangtse gelegene zentralchinesische Provinzhauptstadt Wuhan mit der Metropole Guangzhou (ehemals Kanton) am Perlflussdelta.

In Südchina befinden sich auf einer Fläche von ca. 550.000 km² ausgedehnte Karstgebiete mit spektakulären Landschaften, die unter anderem durch steil aufragende Bergkuppen – Kegelkarst genannt – sowie tiefe Schluchten und Karsthöhlen geprägt sind [1], [2]. Teile dieser Karstgebiete wurden in 2007 und 2014 in die Liste des UNESCO-Weltnaturerbe aufgenommen und werden zunehmend touristisch erschlossen [3].

Auf einer Länge von mehr als 300 km, d.h. rund 30% der gesamten Strecke Wuhan-Guangzhou, verläuft diese durch Karstgebiete, was zu erheblichen Behinderungen beim Auffahren der insgesamt 165 km langen Tunnelstrecke mit 226 Tunnelbauwerken führte und auch die Bauausführung der Erdbaustrecken und der zahlreichen Brückengründungen beeinflusste.

Dennoch konnte nach nur rund 4-jähriger Bauzeit die Inbetriebnahme der Strecke im Jahre 2010 erfolgen. Seitdem verkehren die Hochgeschwindigkeitszüge vom Typ CRH3 in engem Takt von bis zu 8 Zügen pro Stunde und benötigen für die 960 km lange Strecke mit einem Zwischenhalt in Changsha minimal lediglich 3 Stunden 41 Minuten, dies entspricht einer durchschnittlichen Reise-Geschwindigkeit von rund 260 km/h.

Seit 2011 ist auf allen Eisenbahnstrecken in China die zulässige Geschwindigkeit auf 300 km/h reduziert. Zuvor betrug auf der Strecke Wuhan-Guangzhou die maximale Geschwindigkeit fahrplanmäßig 350 km/h.

Am Beispiel des Haitang-Tunnels wird nachfolgend der Karst-Einfluss auf die Tunnelbauarbeiten erläutert.

Bild 1: Typische Kegelkarstlandschaft nördlich von Guangzhou

2 Einfluss von Karst auf den Tunnelvortrieb des Haitang-Tunnels

2.1 Tunnelquerschnitt

Die insgesamt 226 Tunnelbauwerke sind als zweigleisige Tunnelröhren ausgebildet, die je nach Felsklasse ohne Sohlgewölbe (Felsklasse I und II) bzw. mit Sohlgewölbe (Felsklasse III bis VI) ausgebildet sind. Diese Felsklassen unterscheiden sich durch abgestufte Sicherungsmittel, ähnlich den in Deutschland üblichen Ausbruchklassen. Alle Tunnel wurden bergmännisch im Spreng- bzw. Baggervortrieb mit Spitzbetonsicherung aufgefahren. Der Ausbruchquerschnitt ist 14,85 m breit und 12,75 m hoch (155 m²). Der Ausbruch erfolgte in den Teilquerschnitten Kalotte, Strosse und Sohle. Die primäre Sicherung bestand planmäßig aus 28 cm Spritzbeton C25, einlagig bewehrt mit ∅ 8, a = 20 cm, sowie aus Stahlbögen im Abstand von 0,6 m und aus 4 m langen Felsnägeln, die in einem Raster von 1 m (radial) bzw. 0,8 m (längs) angeordnet sind.

Die Tunnel auf der Strecke Wuhan-Guangzhou sind - bis auf wenige Ausnahmen - alle drainiert ausgebildet, d.h. sie besitzen eine Abdichtung aus einer Kunststoffdichtungsbahn im Tunnelgewölbe oberhalb der Gleisebene. Die Innenschale - überwiegend 50 cm dick und im Sohlbereich bis auf 60 cm verstärkt - besteht aus wasserundurchlässigem Beton C35, der radial und längs mit jeweils 2 Lagen ∅ 20, a = 20 cm bewehrt ist. In den Felsklassen I bis III wurde die Innenschale unbewehrt mit einer Schalendicke von 35-45 cm ausgeführt.

2.2 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Der 2.898 m lange Haitang-Tunnel befindet sich etwa in der Mitte der Strecke Wuhan-Guangzhou. Der Baugrund ist hier geprägt von einer Großfaltenstruktur mit karbonischen und permischen Gesteinen, die im nördlichen Bereich von geringmächtigen quartären Hangschuttsedimenten (schluffiger Ton, zum Teil kiesig, mit eingelagerten Blöcken), im südlichen Bereich von bis zu 80 m mächtigen schluffigen Tonen, überdeckt werden. Die Überdeckung des Tunnels beträgt maximal etwa 110 m. Auf nahezu der gesamten Länge verlief der Tunnel in Kalksteinen. Hier war der Vortrieb durch Karst erheblich erschwert. Im Bild 2 sind die Vortriebsabschnitte markiert, in denen während der Vortriebsarbeiten Karsthohlräume angetroffen wurden.

Am Haitang-Tunnel ist Karst vorwiegend in folgenden Ausprägungen aufgetreten:

- Offene Karsthohlräume;
- mit Lockergestein gefüllte Hohlräume, zum Teil schlotartig ausgebildet;
- oberflächennaher Karst mit sehr unregelmäßiger Grenzfläche zwischen Fels und Lockergestein;
- Bergwasserstrom in unterirdischen Flüssen.

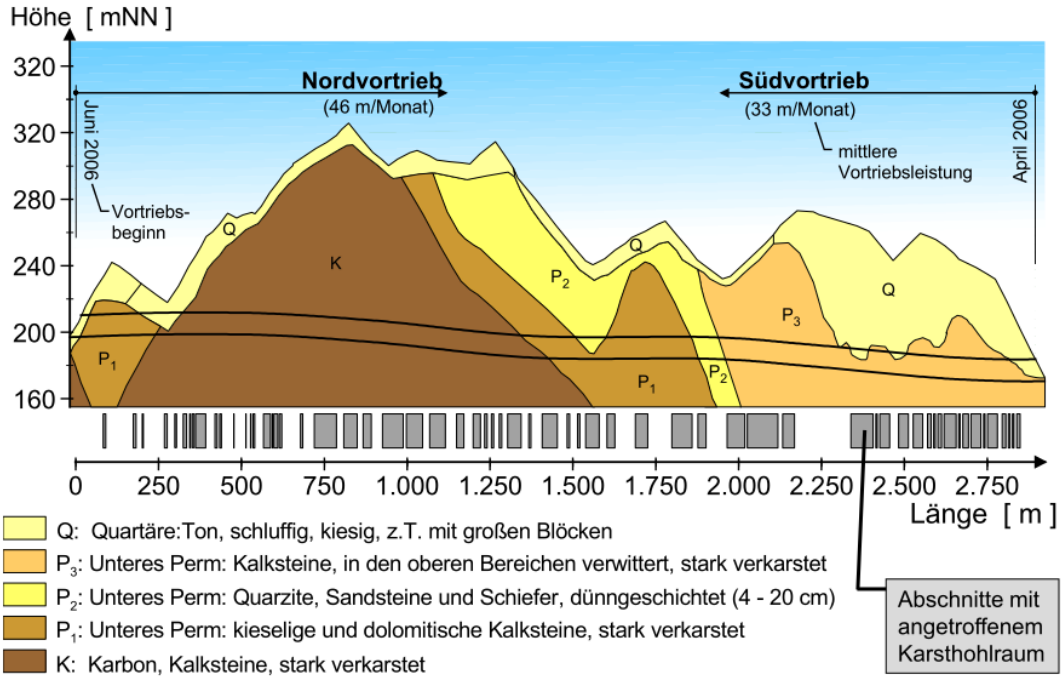

Bild 2: Haitang-Tunnel – Geologischer Längsschnitt mit Abschnitten, in denen beim Tunnelvortrieb Karsthohlräume angetroffen wurden

2.3 Verbruch infolge Karstschlot

Im Zuge des Tunnelvortriebs im Karst ist es zu einer Reihe von Verbrüchen gekommen. Einer dieser Verbrüche ereignete sich etwa an der Station 1.140 m im Nordvortrieb, bei dem ein mit Lockergestein gefüllter Karstschlot angetroffen wurde. Es flossen insgesamt rund 2.000 m³ Erdbrei (weicher Schluff und Sand) in den Tunnel ein (Bild 3). Hierbei wurden die Rohre des bereits installierten Rohrschirmes (Durchmesser: 89 mm, Länge: 6 m, Abstand: 40 cm) zum Teil in das Tunnelinnere zurückgedrückt und erzeugten mehr als 40 cm tiefe und bis zu 20 m breite Furchen an der Oberfläche der vorbeifließenden Verbruchmasse, die insgesamt 32 m weit in den Tunnel eindrang. An der Geländeoberfläche bildete sich ein etwa 10 m tiefer Verbruchkrater mit einem Durchmesser von rund 20 m aus. Und dies, obwohl oberhalb des Tunnels eine Überdeckung von fast 100 Metern bestand. Die im direkten Umfeld vorab hergestellte, vertikale Erkundungsbohrung und auch die aus dem Tunnel heraus ausgeführten Vorauserkundungen mit Horizontalbohrungen und mit Seismik (hier kam die TSP-Methode zum Einsatz) hatten gezeigt, dass in diesem Vortriebsabschnitt grundsätzlich mit tiefreichenden Verkarstungen zu rechnen ist.

Der angetroffene Karstschlot war jedoch nicht explizit vorhergesagt worden, wahrscheinlich aufgrund seiner geringen Abmessungen von vermutlich weniger als 1 m² Querschnittsfläche, die zu gering ist, um zuverlässig identifiziert zu werden. Es wäre Zufall gewesen, wenn dieser Karstschlot bei den ausgeführten Vorausbohrungen oder mit der ausgeführten geophysikalischen Vorauserkundung angetroffen worden wäre. Im Karstgebirge verbleibt somit letztlich ein Restrisiko, dass – trotz sorgfältig ausgeführter Baugrunderkundung während der Planungsphase und vortriebsbegleitender Vorauserkundung – im Zuge des Vortriebs unentdeckte Karsthohlräume angetroffen werden, die die Vortriebsarbeiten erheblich behindern können.

Zur Bewältigung der Verbruch-Situation wurde ein Umgehungsstollen gebaut, um die Vortriebsarbeiten für den Haupttunnel möglichst rasch fortsetzen zu können. Anschließend wurde der Karstschlot durch ein engmaschiges Netz von Rohrschirmen gesichert, die von mehreren Seiten horizontal in den Schlotbereich knapp oberhalb des Haupttunnelprofils vorgetrieben wurden. Ergänzt wurde diese mechanische Sicherung durch Injektionen im Schlot oberhalb des Rohrschirmnetzes. Auf diese Weise konnte ein Nachbrechen von Verbruchmasse in das Tunnelinnere zuverlässig verhindert werden.

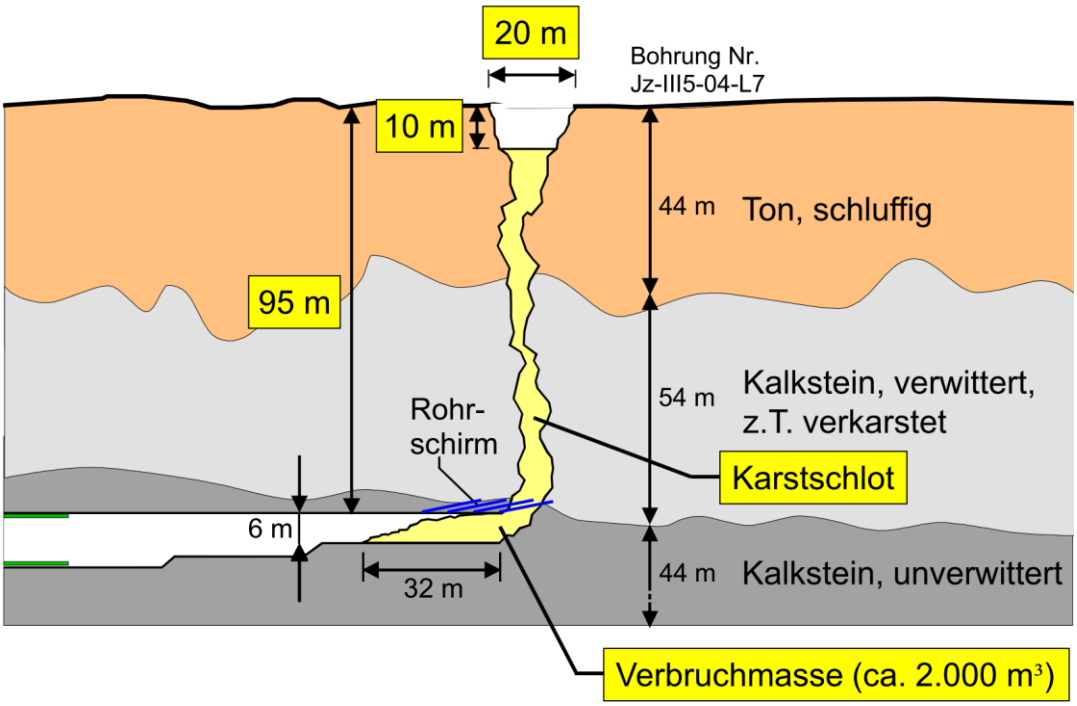

Bild 3: Haitang-Tunnel, Nordvortrieb, Station 1.140 m – Verbruch infolge Karstschlot

2.4 Antreffen einer 4000 m³ großen Karsthöhle

Allein auf den ersten ca. 900 Metern des Südvortriebs wurden bereits mehr als 40 Karsthohlräume angetroffen, die sehr unterschiedliche Größen aufwiesen (Bild 4). Sie reichen von einigen Zentimeter bis Dezimeter breiten, aufgeweiteten Klüften bis hin zu ausgedehnten Höhlen und Höhlensystemen von mehr als 60 m Länge und bis zu 15 m Höhe.

Nachdem sich nach ca. 250 m Vortrieb im Karst ein Verbruch ereignet hatte, bei dem die gesamte Ortsbrust eingestürzt war, war ein Umgehungsstollen erstellt worden, um den Verbruch-Bereich zu passieren und den Vortrieb des Haupttunnels an anderer Stelle weiterführen zu können. Aufgrund erneut angetroffener, massiver Behinderungen infolge Karst, musste teilweise sogar eine Umgehung der Umgehung erstellt werden.

Hierbei wurde nach ca. 500 Metern knapp oberhalb der Stollenfirste eine ca. 4.000 m³ große Karsthöhle angetroffen (Bild 5). Dieses Höhlensystem war insgesamt ca. 60 m lang, überwiegend etwa 4 m bis 8 m breit

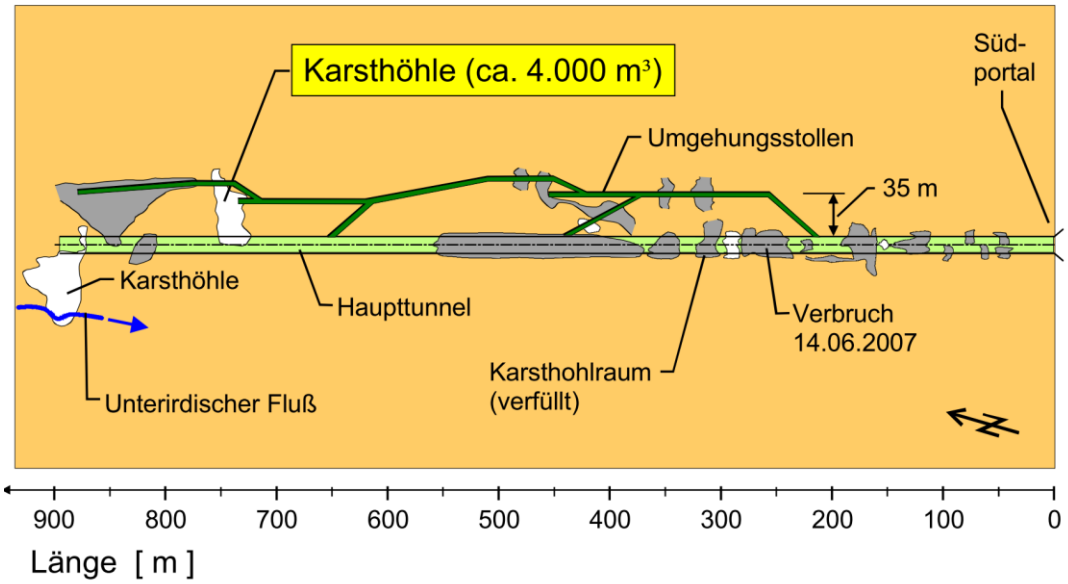

Bild 4: Lageplan Haitang-Tunnel mit angetroffenen Karsthöhlen – Ausschnitt Südportal

Bild 5: Haitang-Tunnel – 4000 m³ große Karsthöhle

und maximal 10 m hoch. Es bestand aus einer Kette von mehreren einzelnen Hohlräumen, die bis in den Querschnitt des Haupttunnels hineinragten. Im Sohlbereich war die Höhle über mehrere Meter Mächtigkeit mit Lehm gefüllt, der beim Anschneiden dieses Karsthohlraumes an der Ortsbrustböschung des Umgehungsstollens anstand.

In der Firste der Karsthöhle befanden sich mehrere Felsplatten, die herabzufallen drohten und durch Felsnägel gesichert werden mussten. Als Sofortmaßnahme wurde der Teil der Höhle, der bis in den Querschnitt des Haupttunnels ragte, sowie ein Bereich von etwa 10 m außerhalb des Tunnelquerschnittes mit Beton verfüllt. Des Weiteren war überlegt worden, in der Sohle der Höhle Beton mit einer Mächtigkeit von ca. 2 m einzufüllen. Im Schutze dieser Betonplatte hätte der Vortrieb des Umgehungsstollens fortgesetzt werden können. Die Baufirma hat sich jedoch auf Grund der Kosten und vor allem der Terminsituation dazu entschlossen, diese große Karsthöhle mit einem Umgehungsstollen zu umfahren.

2.5 Verfüllung von offenen Karsthohlräumen

Eine weitere große Karsthöhle wurde im Haupttunnel des Südvortriebs nach ca. 870 m Vortrieb angetroffen (Bild 4). Diese Karsthöhle war etwa 70 m lang, überwiegend etwa 3 m bis 5 m hoch und lag größtenteils außerhalb des Ausbruchquerschnitts. Es wurde daher beschlossen, dass lediglich im Nahbereich des Tunnels, d.h. in einem Abstand zum Tunnel von bis zu 15 m, die Karsthöhle mit Beton verfüllt wird. Hierzu wurde in der Karsthöhle eine Schalung gestellt. Nachdem der Tunnelvortrieb diese Stelle passiert hatte und die Spritzbetonschale installiert war, wurde die ‘Betonplombe’ in der Karsthöhle durch Einpumpen von Ortbeton C20 verfüllt.

Innerhalb dieser Karsthöhle befand sich zudem ein unterirdischer Fluss, der sich durch deutliche Fließgeräusche bemerkbar machte und sich etwa in Höhe der Sohle des Haupttunnels befand, jedoch seitlich der Tunneltrasse. Es war demnach damit zu rechnen, dass beim weiteren Tunnelvortrieb dieser unterirdische Fluss im Ausbruchquerschnitt angetroffen werden kann. Der dann eintretende Wassereinbruch würde eine erhebliche Gefährdung der Mineure und der Stabilität des Tunnels darstellen. Bei der Ausführung der vorlaufenden Vorauserkundung wurde daher auf diesen Aspekt besonders geachtet.

Die Verfüllung von offenen Karsthohlräumen erfolgte üblicherweise aus dem Tunnel heraus nach Herstellung der Spritzbetonschale. Hierzu waren teilweise Luftbögen erforderlich. Die Spritzbetonschale diente dann als innenliegende Schalung für das Verfüllen mit Pumpbeton.

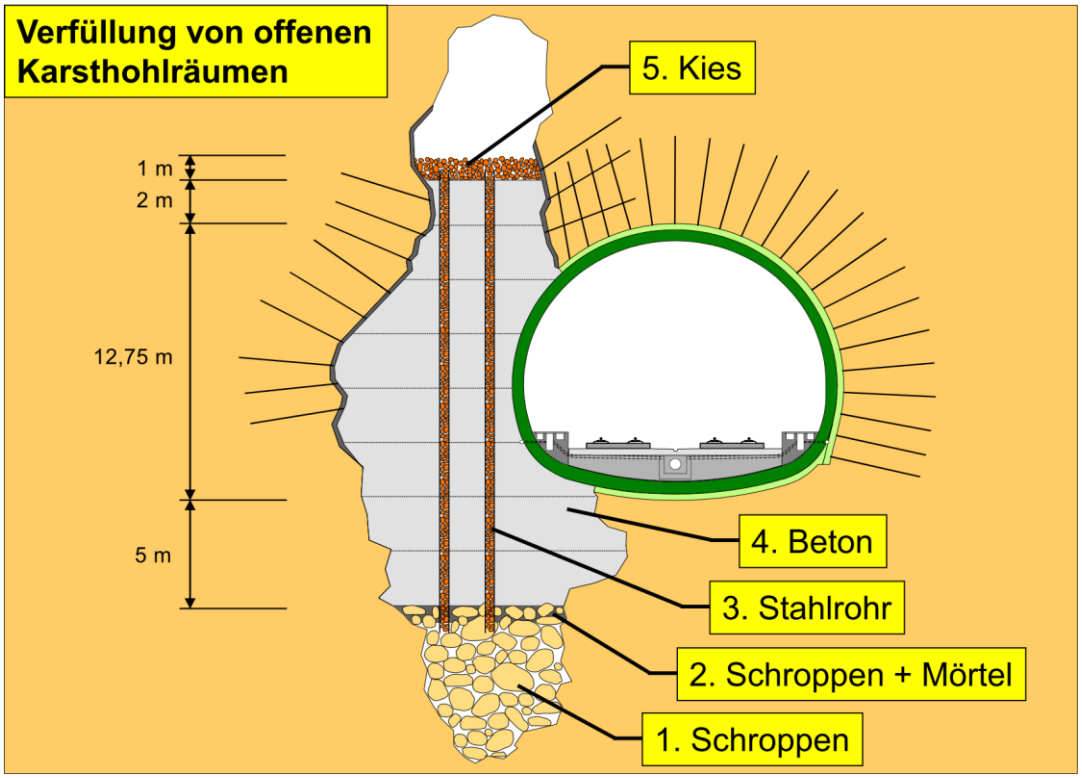

Bild 6: Verfüllung von offenen Karsthöhlräumen

Wesentlich zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit des Tunnelbauwerkes ist eine möglichst verformungsarme, tragfähige Verfüllung der Karsthohlräume in der unmittelbaren Umgebung des Tunnels, um die Tragwirkung des hier lokal fehlenden Gebirgstragringes wiederherzustellen. Zudem sollte die Wasserwegsamkeit, die sich innerhalb des Karsthohlraumes gebildet hat, auch nach der Verfüllung des Hohlraumes möglichst erhalten bleiben, um einen ungewollten Wasseraufstau und damit eine entsprechend große Belastung der Tunnelschale durch Wasserdruck zu vermeiden.

Das Bild 6 zeigt beispielhaft die Verfüllung eines offenen Karsthohlraumes, der bis unter die Tunnelsohle reicht. In einem ersten Schritt wurde die Hohlraumlaibung – insbesondere im Firstbereich – durch Felsnägel (Länge: 6 m) und Spritzbeton mit Baustahlmatten gesichert, um die Vortriebsmannschaft vor Felsblöcken zu schützen, die herabzufallen drohten. Dann wurde der Hohlraum von unten nach oben zunächst mit Schroppen, d.h. mit gebrochenem Material in Stein- und Blockgröße verfüllt bis etwa 5 m unterhalb der Tunnelsohle. Darüber wurde eine ca. 30 cm dicke Lage Schroppen-Mörtel-Gemisch zur Abdichtung verwendet, das als abdichtende Basis für die spätere Betonverfüllung dient.

Zur Sicherstellung der Wasserwegsamkeit innerhalb des verfüllten Karsthohlraumes wurden Stahlrohre (Durchmesser: 40 cm) im Raster von 2 x 2 m eingestellt und mit Kies verfüllt. Anschließend wurde der Bereich von 5 m unterhalb der Tunnelsohle bis 2 m oberhalb der Tunnelfirste durch lagenweisen Einbau von Beton C25 verfüllt. Oberhalb der Betonfüllung wurde – sofern zugänglich – eine 1 m dicke Schutzschicht aus Kies eingefüllt, die die Betonfüllung und die Stahlrohre schützen soll, falls Felsstücke herabfallen sollten und dass diese im Falle eines Felsnachbruchs weiterhin als Drainageschicht wirken kann.

Karsthohlräume, die mit Lockergestein bzw. mit Felsblöcken gefüllt sind, wurden am Haitang-Tunnel in der Regel durch Injektionen verfestigt, die aus dem Tunnel heraus ausgeführt wurden.

3 Zusammenfassung

Bei der Ausführung der Eisenbahnhochgeschwindigkeitsstrecke Wuhan-Guangzhou wurde deutlich, welch große Herausforderungen der ausgeprägte Karst Südchinas an Tunnelbauarbeiten stellt. Die Projektausführung hat gezeigt, dass man durch Konventionelle Tunnelvortriebe in der Spritzbetonbauweise in der Lage ist, sehr flexibel und rasch auf Karstprobleme zu reagieren. Es verbleibt jedoch – auch bei sorgfältiger vorlaufender Baugrunderkundung und vortriebsbegleitender Vorauserkundung – ein gewisses Restrisiko, dass nicht alle Karststrukturen bzw. nicht in ihrer gesamten Ausprägung vorab erkannt werden und zu unvorhergesehenen Schwierigkeiten bei den Sicherungs- und Ausbauarbeiten führen können. Dies sollte Bauherrn, Planern und Baufirmen bei der Bewältigung derartiger Bauaufgaben bewusst sein.

4 Literatur

[1] University of Auckland, New Zeeland, faculty of Science, School of environment (2010):
World map of Carbonate Extent.

[2] Gunn, J. (2004):
Encyclopedia of Caves and Karst Science. Fitzroy Dearborn, An imprint of the Taylor and Francis Group New York London.

[3] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2014):
Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage. World heritage committee. Thirty-eighth session, Doha, Qatar, 15 - 25 June 2014.

[4] Kreutzer, M., Holzhäuser, J. (2009):
Tunnelvortriebe (165 km) der HGV-Eisenbahnstrecke Wuhan-Guangzhou, China: Einfluss von Karsthohlräumen und Problemlösungen in städtischem Umfeld. Vorträge auf der STUVA-Tagung ’09 in Hamburg, Forschung und Praxis, Nr. 43, S. 136-142.

Autor:

Dr. Jörg Holzhäuser
HIC · Holzhäuser Ingenieur Consult GmbH
Ludwig-Erhard-Str. 2
D-76275 Ettlingen

gu kommunikation

HIC Holzhäuser Ingenieur Consult GmbH
Ludwig-Erhard-Str. 2
76275 Ettlingen
Telefon +49 7243 56170-10
Telefax +49 7243 56170-90

info@hic-engineering.de
www.hic-engineering.de