

Grundkonzept zur Lösung der Karst- und Erdfallproblematik für den Bau von Verkehrswegen

Von Rudolf Pöttler, Volkmar Schneider, Erich Rehfeld und Hubert Quick

Eisenbahnfahrwege stellen sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr eine Alternative zu den Autostraßen dar. Um kurze Reise- und Transportzeiten sichern zu können, müssen die zu bedienenden Orte möglichst ohne nennenswerte Umwege erreicht werden.

Dies bedingt, daß unter Umständen ungünstige geologische Verhältnisse durchfahren und ingenieurtechnisch beherrscht werden müssen. Für die im Bau befindliche Hochgeschwindigkeitsstrecke NBS Nürnberg-Ingolstadt bedeutet dies, daß der gewählte Verkehrskorridor höchste Anforderungen an die Erkundungstechnik, Planung und Ausführung stellt, die durch umfangreiche, ergänzende Untersuchungen gestützt werden müssen.

Basic Concept for Solving Karst and Sinkhole Problems in the Course of Traffic Routes

Traffic routes in areas affected by karstification constitute a technical challenge for all those involved in their construction. The course of action and the measures taken for ensuring a safe construction of the structures and the lasting serviceability of the traffic routes are the topic of this paper. The described course of action was implemented on Deutsche Bahn's (DB AG) new Nürnberg-Ingolstadt High-Speed Railway Line and is applicable to other traffic routes in karst regions. The exploration strategies have to be adapted to the pertinent karst characteristics and to the geological boundary conditions.

Verkehrsstrecken in von Verkarstung betroffenen Bereichen stellen eine technische Herausforderung an alle am Bauvorhaben Beteiligten dar. Die Vorgehensweise und die getroffenen Maßnahmen zur Gewährleistung einer sicheren Erstellung der Bauwerke und einer dauerhaften Gebrauchsfähigkeit des Verkehrswegs sind Gegenstand dieses Beitrags. Die dargelegte Vorgehensweise wurde auf der Neubaustrecke (NBS) Nürnberg-Ingolstadt der Deutschen Bahn AG praktiziert und ist für andere Verkehrswege in karstgefährdeten Gebieten übertragbar. Die Erkundungsstrategien sind dabei der jeweiligen Karstcharakteristik und den geologischen Verhältnissen anzupassen.

Im südlichen Streckenabschnitt vom Tunnel Irlahüll bis Tunnel Geisberg (Bau-km 61.000 bis 80.050) liegt die NBS-Trasse in von Verkarstung betroffenen Kalk- und Dolomitsteinen des Weißjuras, wobei diese Gesteine sowohl oberflächlich unter geringmächtiger quartärer Überdeckung als auch im tieferen Untergrund unter bis 35 m mächtiger tertiärer Lockergesteinsüberdeckung anstehen (Bild 1). Die Kalk- und Dolomitsteine des Weißjuras sind unterschiedlich verkarstungsanfällig und bei gleicher Verkarstungsanfälligkeit lokal verschieden stark von der Verkarstung betroffen. Dadurch sind die Gebirgsverhältnisse durch ein heterogenes Nebeneinander von Verkarstungsstrukturen unterschiedlicher Art und Größe und unverkarsteten, massiven Gebirgsbereichen gekennzeichnet. Dieses heterogene Gebirge wird von der Trasse der NBS Nürnberg-Ingolstadt in den Tunneln Irlahüll, Stammham und Geisberg sowie in den Felseinschnitten im Köschinger Forst durchfahren.

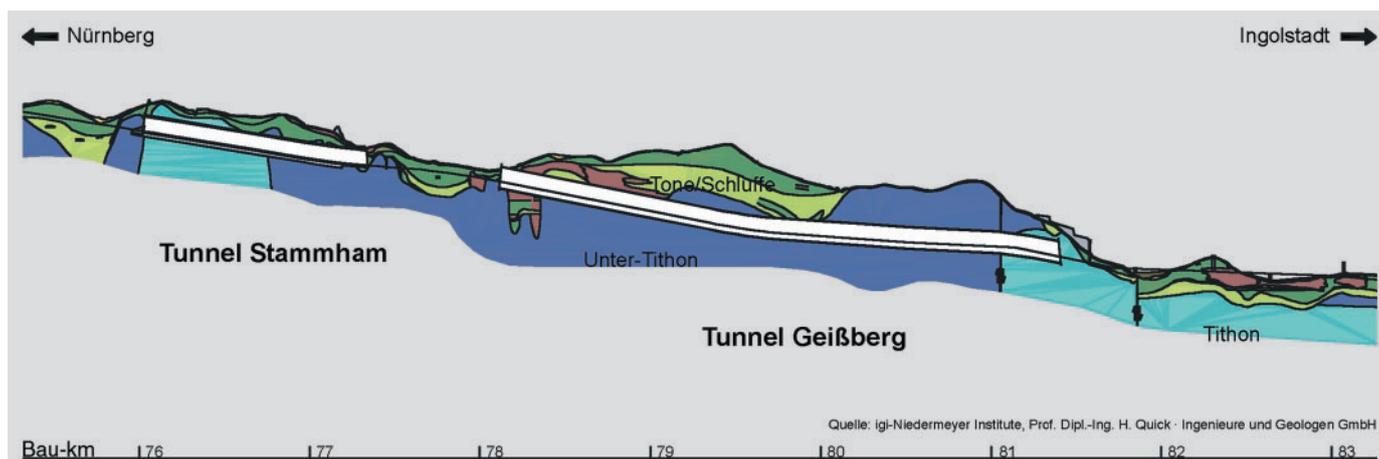


Bild 1 Geologischer Längsschnitt der NBS-Trasse im karst- und erdfallgefährdeten Bereich (Tunnel Stammham, Tunnel Geißberg).

Fig. 1 Geological longitudinal section of the new railway line in the karst and earthfall zone (Stammham tunnel, Geißberg tunnel).



RWE Solutions Austria GmbH

LASTENSTRASSE 19
A-1233 WIEN
TEL.: +43-1-86386-0
FAX.: +43-1-86386-610
E-MAIL: info@rwesolutions.at
WEB: www.rwesolutions.at

WIR LIEFERN:

ENERGIETECHNISCHE ANLAGEN • BELEUCHTUNGSTECHNIK
• SICHERHEITS- UND NACHRICHTENTECHNISCHE ANLAGEN
• BRANDMELDEANLAGEN • VERKEHRSERFASSUNG UND
VERKEHRSSTEUERUNG • LÜFTERSTEUERUNG UND LÜF-
TERREGELUNG • KOMMUNIKATIONSEINRICHTUNGEN
• DATENÜBERTRAGUNGS-EINRICHTUNGEN • WARTEN- UND
ZENTRALE LEITTECHNIK



**Verkehrslösungen –
Tunneltechnik**

Einbindung in den RWE-Konzern:

Die RWE Solutions Austria GmbH ist die Österreich-Tochter der RWE Solutions, einem Unternehmen des RWE-Konzerns. Mit 18.000 Mitarbeitern in über 100 Ländern ist RWE Solutions ein verlässlicher Partner für Kunden aus den Bereichen Industrieanlagen, Energieversorgung, Telekommunikation und Infrastruktur. Die Kompetenzen werden weltweit eingesetzt, um Produkte und Dienstleistungen für den kompletten Lebenszyklus von Versorgungsnetzen, Anlagen und Objekten anbieten zu können. Um der Bedeutung des österreichischen Marktes Rechnung zu tragen und die Kundennähe auch im Namen zu dokumentieren, wurde das seit 1993 im 100% Eigentum der SAG (Rechtsvorgänger von RWE Solutions) stehende, österreichische Traditionsunternehmen SAG-SCHRACK Anlagentechnik AG zuerst in TESSAG AUSTRIA AG und anschließend in RWE Solutions AUSTRIA GmbH umfirmiert.

Die RWE Solutions Austria GmbH ist das Kompetenzzentrum für Verkehrslösungen und Tunneltechnik innerhalb des RWE-Konzerns.

Folgende Aufträge wurden im letzten Jahr ausgeführt bzw. sind in Bearbeitung:

- Tunnel Schweizermais
- Tunnel Obdach
- Erneuerung Pfändertunnel
- Leittechnik Tunnel Zigeunerbrücke
- Tunnel Steinhaus
- Betriebsleitebene N2 Stans-Bellinzona, Schweiz (zentrales Leitsystem für 26 Tunnelanlagen)
- Erneuerung Felbertauerntunnel
- Tunnel Schnepfau
- Leittechnik Ortsumfahrung Stainach
- Tunnel Spital
- Tunnel Semmering

Karstentwicklung

Die durch Verkarstung geprägte Landschaftsformung der Frankenalb erfolgte während einer rund 100 Mill. Jahre andauernden Zeitspanne seit der Kreidezeit. Dabei lassen sich grob drei Verkarstungszyklen, unterbrochen von Sedimentationsphasen, unterscheiden. Die ersten beiden Phasen erfolgten, unterbrochen durch die Transgression des Oberkreide-Meers, im Verlauf der Unterkreide und des Alttertiärs. Die Verkarstung erfolgte dabei meist unter klimatischen Bedingungen, welche die Lösung karbonatischer Gesteine begünstigten (feuchttropische Verhältnisse), in einem Zeitraum von jeweils 40 Mill. Jahren. Während dieser Zeiten erfolgte zum einen eine flächenhafte Korrosion der Gesteine des Weißjuras und zum anderen eine tiefreichende Verkarstung mit der Ausbildung eines unterirdischen Entwässerungssystems. Ein Großteil des heutigen Systems mit Karstspalten und Höhlen wurde während dieser Zeiten angelegt. Hochliegende Karstsysteme wurden dabei zeitweise mehrmals reaktiviert und sind wieder trockengefallen.

Im mittleren Tertiär geriet das Gebiet in den Ablagerungsraum der Oberen Süßwassermolasse (OSM). Die fluvialtilen (Kiese, Sande) und lakustrischen (Schluffe, Tone, Süßwasserkalke) Sedimente der OSM plombieren das Karstrelief sowie einen Teil des unterirdischen Karstsystems.

Mit der flußgeschichtlichen Entwicklung im Quartär wurde mit dem Einschneiden der Urdo- nau in den Albkörper das Vorflutniveau und damit auch das aktive Karstsystem zunehmend tiefergelegt. In diesem Verlauf wurden alte Systeme

teilweise inaktiv und verfüllt, andere wiederum erneut aktiviert und ausgeräumt. Oberflächlich zeigt sich dies an den in jüngster geologischer Vergangenheit gebildeten Dolinen auf den Albhochflächen.

Das heutige Bild der Frankenalb ist geprägt von Albhochflächen, die sich durch das weitgehende Fehlen eines oberirdischen Entwässerungsnetzes auszeichnen, und darin steil eingeschnittene, gewundene Flußtäler. Offene Karsthohlräume treten verstärkt in den talrandnahen Lagen und auf den Hochflächen im Bereich von Dolinen mit aktiven Schlucklöchern auf. Wasserführende offene Karsthohlräume befinden sich überwiegend am Fuß der Talflanken (1, 2).

Bedingungen zur dauerhaften Gebrauchstauglichkeit von Eisenbahnfahrwegen

Aus sicherheitstechnischer und betrieblicher Sicht muß der Baugrund so beschaffen sein oder dahingehend ertüchtigt werden, daß kein Bruch und keine bruchartigen Verformungen sowie keine fahrdynamisch-kritischen Zustände eintreten und der Fahrweg bei hohem Fahrkomfort ständig verfügbar ist. Der gegenseitige Verschleiß von Fahrweg und Fahrzeug sowie der Instandhaltungsaufwand sollten möglichst niedrig bleiben.

Dies bedeutet, daß im Lauf der Betriebsjahre infolge der Verkarstung des Baugrunds im Einflußbereich statischer und dynamischer Kräfte kein Zusammenbruch der Gebirgsstrukturen und keine unzulässigen Verformungen, insbesondere keine nennenswerten Verformungsunterschiede entstehen dürfen.

Die in den Regelwerken (3, 4, 5) genannten Kriterien zu Ausrundungsradien und Rampen- neigungen der Gradienten sowie gegenseitige Höhenfehler der Schienen gelten grundsätzlich auch für verkarsteten Baugrund. Sie können bei den sehr komplexen und komplizierten Verhältnissen eines verkarsteten und erdfallgefährdeten Gebirges unter Umständen zu extrem hohen Aufwendungen führen. Es ist deshalb zu bedenken, daß die sehr strengen Forderungen der Deutschen Bahn AG keine Grenzwerte der Fahr- sicherheit darstellen, sondern aus Gründen des Fahrkomforts und des Verschleißes formuliert wurden. Aus wirtschaftlichen Gründen sollten also Verformungskriterien unter Würdigung der jeweils konkreten Situation so gewählt werden, daß keine sicherheitsrelevanten kritischen Zustände eintreten.

Aus diesen allgemeinen Forderungen folgt, daß der Baugrund eines Eisenbahnfahrweges wie bei jedem anderen Ingenieurbauwerk entsprechend dem Stand der Technik erkundet, untersucht und gegebenenfalls ertüchtigt werden muß. Im Ergebnis eingehender Baugrunduntersuchungen und eventueller Baugrundertüchtigungen muß es dann möglich sein, den Baugrund qualitativ und quantitativ so zu beschreiben, daß

**INGENIEURBÜRO
LAABMAYR
& PARTNER ZT GmbH**

FELSBAU • TUNNELBAU
GRUNDBAU • BAUSTATIK

<p>DIPL.-ING. FRANZ LAABMAYR</p> <p>Preishartweg 4 A - 5020 Salzburg Austria</p>	<p>DIPL.-ING. MANFRED EDER</p> <p>Telefon (+43/662) 43 07 03 - 0 Telefax (+43/662) 43 07 03 - 33 e-mail laabmayr-sbg@aon.at</p>
--	---

- ⇨ Eine Verformungsprognose entlang der gesamten Strecke erarbeitet werden kann,
- ⇨ Innere Erosionen verfüllter Karststrukturen sowie Kontakt- und Spalterosionen im Übergangsbereich vom Locker- zum Festgestein (Karstgebirge) hinreichend sicher beurteilt werden können.

Für die Ertüchtigung des Baugrunds und die Gestaltung des Fahrwegs in verkarsteten und erdfallgefährdeten Streckenabschnitten sollten folgende Grundsätze gelten:

- ⇨ Unabhängig von der Entwurfsgeschwindigkeit und der Art des Oberbaus muß ein Bruch des Fahrwegs ausgeschlossen werden können.
- ⇨ Die Verbesserung beziehungsweise Ertüchtigung des Baugrunds hat Vorrang vor der konstruktiven Sicherung der Erdbauwerke und des Fahrwegs. Ergänzende Ertüchtigungen sollten möglichst ohne Einschränkung des Betriebs möglich sein.
- ⇨ Relevante offene Karststrukturen dürfen im Übergang vom Locker- zum Festgestein nicht verbleiben.
- ⇨ Überschreitungen von normgerechten Beanspruchungen der Fahrwegelemente insbesondere der Schienen und der Fahrbahnen dürfen nicht zum Bruch führen.
- ⇨ Alle baulichen Maßnahmen dürfen die Verkarstungs- und Erdfallgefahr nicht verstärken.
- ⇨ Auf eine permanente Überwachung des Fahrwegs ist möglichst zu verzichten.

Stufenkonzept

Gefährdungsbilder

Für Verkehrswege sind die Bau- und die Betriebsphase, zwei Abschnitte mit wesentlich unterschiedlichen Anforderungen, zu betrachten und zu bewältigen. In der Bauphase werden der Tunnel aufgefahren und die Erdbauwerke, Dämme und Einschnitte hergestellt. Die konstruktiven und baubetrieblichen Maßnahmen sind so zu wählen, daß die Herstellung der Bauwerke wirtschaftlich möglich ist. In der zweiten Phase, der Betriebsphase, müssen die Randbedingungen derart gesetzt werden, daß die dauerhafte Betriebssicherheit des Bauwerks unter besonderer Beachtung der Anforderungen an den Fahrweg und dessen langfristiger Lagestabilität gewährleistet werden kann.

Für diese beiden Phasen sind geologisch/hydrogeologische Randbedingungen (Karststrukturen wie verfüllte und offene Hohlräume, Karstwasserhältnisse) in Form von Gefährdungsbildern zu erarbeiten, die den Erfolg der Bau-

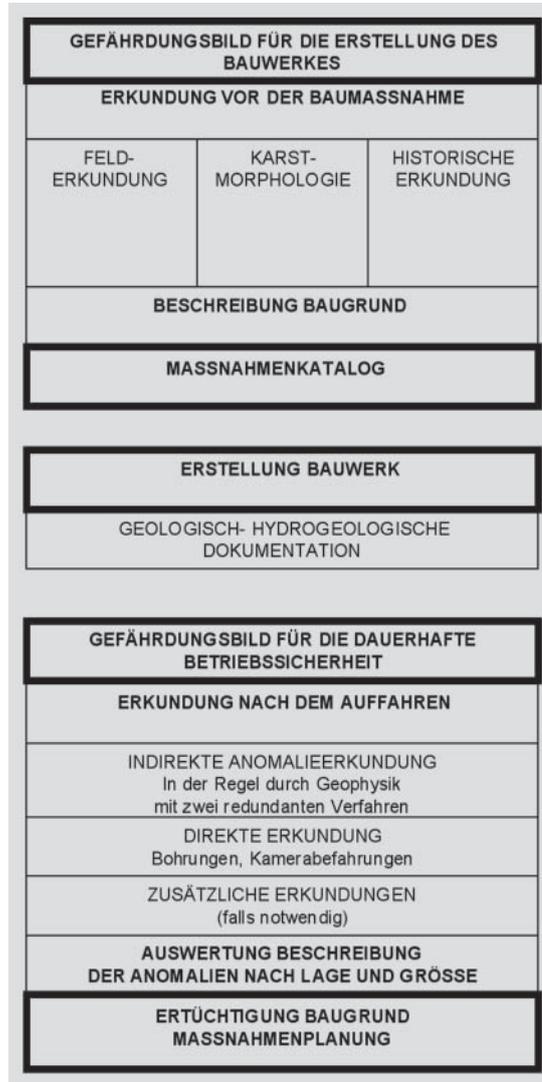


Bild 2 Stufenkonzept zur Beherrschung der Karst- und Erdfallproblematik.

Fig. 2 Stepwise concept for solving the karst and rockfall problems.

maßnahme gefährden können. Die Gefährdungsbilder bedürfen im Verlauf der Baumaßnahme und des Erkenntniszuwachses einer stetigen Überprüfung und eventuellen Korrektur. Basierend auf den phasenspezifischen Gefährdungsbildern werden Maßnahmen zu deren Beherrschung geplant und angeordnet. Wesentlichen Einfluß auf die Gefährdungsbilder haben die geologisch/hydrogeologischen Verhältnisse, die im Vorfeld zu erkunden sind.

Ziel der Erkundungsmaßnahmen ist es, die in den Gefährdungsbildern beschriebenen Strukturen lage- und größenordnungsmäßig zu erfassen. Die Gefährdungsbilder stellen dabei das Leistungsbild der in der jeweiligen Bauwerksphase durchzuführenden Erkundung dar, wobei die dabei angewandten Methoden hinsichtlich der Relation zwischen Notwendigkeit und Vollständigkeit und der Kosten beziehungsweise

www.geohydraulikdata.de

GEOHYDRAULIK DATA
Geophysical and Hydrogeological Services

e.g. BEAM Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring

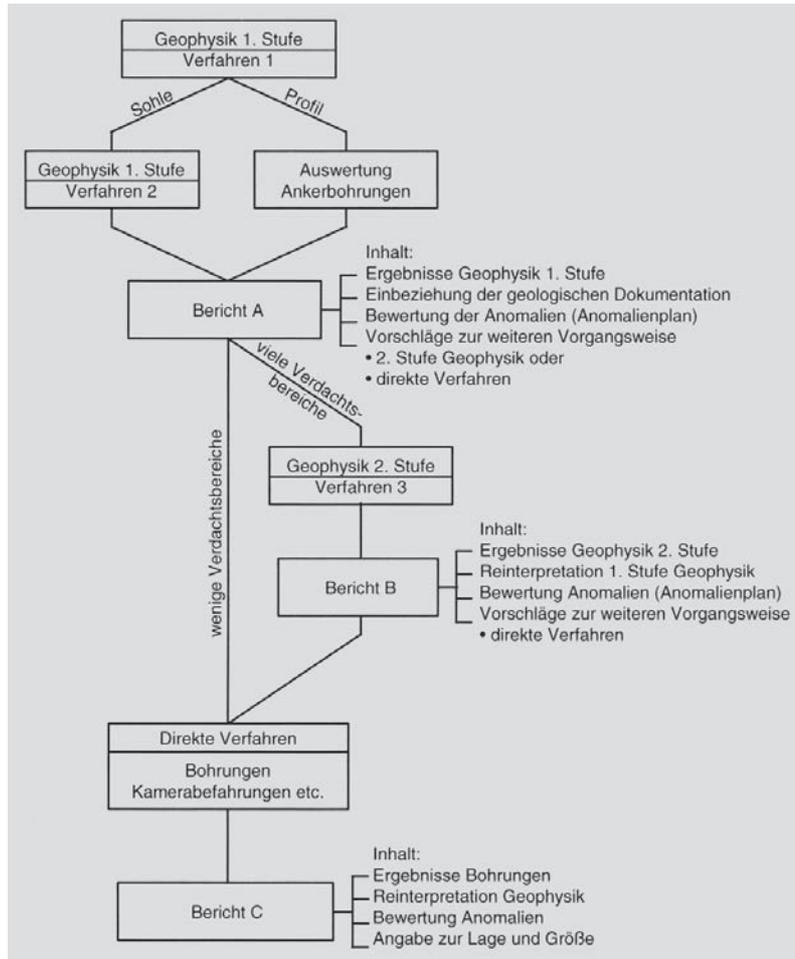


Bild 3 Weitere Erkundungsschritte nach den indirekten Verfahren.

Fig. 3 Further exploratory steps according to indirect methods.

se der Risikominderung und der dadurch verbundenen Kostenminderung gewertet werden müssen. So ist es zum Beispiel in der Stufe der Erkundung vor der Baumaßnahme sinnvoll, auf eine weitergehende Untersuchung auf Karststrukturen mittels in engen Rastern angeordneter Bohrungen im Hinblick auf die besonders bei den Tunnelbauwerken vorliegenden großen Überlagerungshöhen und der daraus resultierenden Unwirtschaftlichkeit dieser Maßnahme bei gleichzeitig nicht vorhandener Garantie der Erfassung aller maßgebenden Karststrukturen zu verzichten. Bei geringen Überlagerungshöhen kann es sinnvoll sein, geophysikalische Er-

kundungen mit anschließenden Bohrungen zur flächendeckenden Baugrunderkundung vor Inangriffnahme der Baumaßnahme durchzuführen.

Die Bewältigung der Karst- und Erdfallproblematik erfolgt durch die Abarbeitung der Aufgabenstellung in einem Stufenkonzept (Bild 2). Das Stufenkonzept besteht aus zwei Hauptstufen analog den beiden grundsätzlichen Fragestellungen für den Bau und Betrieb des Bauwerks. Es folgt dem Prinzip der Erkundung vom Groben ins Feine und dem Aufbau der weiterführenden Untersuchungen auf die vorangegangenen. Die jeweils vorangegangene Untersuchungsmaßnahme ergibt nach deren Auswertung die nächste. So war nach Durchführung der indirekten Verfahren, abhängig von der Anzahl der detektierten Anomalien, vorgesehen, bei einer geringen Anzahl mit direkten Aufschlüssen weitergehend zu untersuchen oder bei einer sehr großen Anzahl mit einer zusätzlichen geophysikalischen Methode die Anzahl der Anomalien einzuschränken und erst dann die aufwendigeren direkten Erkundungsbohrungen durchzuführen (Bild 3).

Beschreibung des Baugrunds für die Erstellung der Bauwerke

Die Erkundungsmaßnahmen vor Baubeginn dienen dem Ziel, das Gebirge für den Vortrieb beziehungsweise Aushub so vollständig zu beschreiben, daß dem Auftragnehmer die Basis für seine Leistungserbringung hinlänglich und ausreichend bekannt ist. Das Ergebnis der Erkundung ist eine Beschreibung des Gebirges mit den wesentlichen Merkmalen der Verkarstung. Basierend auf dieser Beschreibung werden für den Tunnelbau das Vortriebssystem und Standardmaßnahmen zur Bewältigung von Karststrukturen während des Vortriebs festgelegt (Bild 4). Gründungsmaßnahmen für Kunstbauwerke sowie das Gründungskonzept von Erdbauwerken müssen unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zur Verkarstung abgestimmt beziehungsweise optimiert werden. Dasselbe gilt für die Festlegung der Entwässerung und der dazu notwendigen Versickerungsmaßnahmen.

Für den Vortrieb des Tunnels oder die Herstellung der Erdbauwerke sind die Karststrukturen im direkten Bauwerksbereich maßgebend. Auf der NBS Nürnberg-Ingolstadt war über weite Strecken mit unverfüllten Karsthohlräumen zu rechnen, die im an und für sich standfesten Gebirge auftraten. Als maßgebendes Gefährdungsbild für die Erstellung der Baumaßnahme wurden daher große offene Klüfte im Bauwerk oder dessen unmittelbarer Umgebung definiert.

Es sind folgende Erkundungen vor Herstellung der Baumaßnahme durchzuführen und im Hinblick auf die Gefährdungsbilder auszuwerten:

- ◇ Karstmorphologie (Streifenkartierung),
- ◇ Historische Erkundung (Literatur, Geologie, Hydrogeologie, Tektonik, Speleologie),

GGU GESELLSCHAFT FÜR GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN

Geophysik

zerstörungsfreie Prüfung

unsere Dienstleistungen

SEISMIK
GEORADAR
GEOtherMIK
GRAVIMETRIE
GEOELEKTRIK
ULTRASCHALL
GEOmAGNETIK
ELEKTROMAGNETIK
ERSCHÜTTERUNGSMESSUNG

Dienstleistungen für

GEOLOGIE
GEOtechnIK
PROSPEKTION
ARCHÄOMETRIE
HYDROGEOLOGIE
BAUWERKSDIAGNOSTIK
ALTlastENERKUNDUNG
BAUGRUNDUNTERSUCHUNG
HOHLRAUM- UND OBJEKTTORTUNG

Fordern Sie Informationen an!

Tel. 0721/28678 Fax. 0721/25408 GGUmbH, Amalienstr. 4, D-76133 Karlsruhe

- ⇨ Felderkundungsprogramm im Vorfeld der Bauausführung.

Beschreibung des Baugrunds zur Gewährleistung der dauerhaften Betriebssicherheit

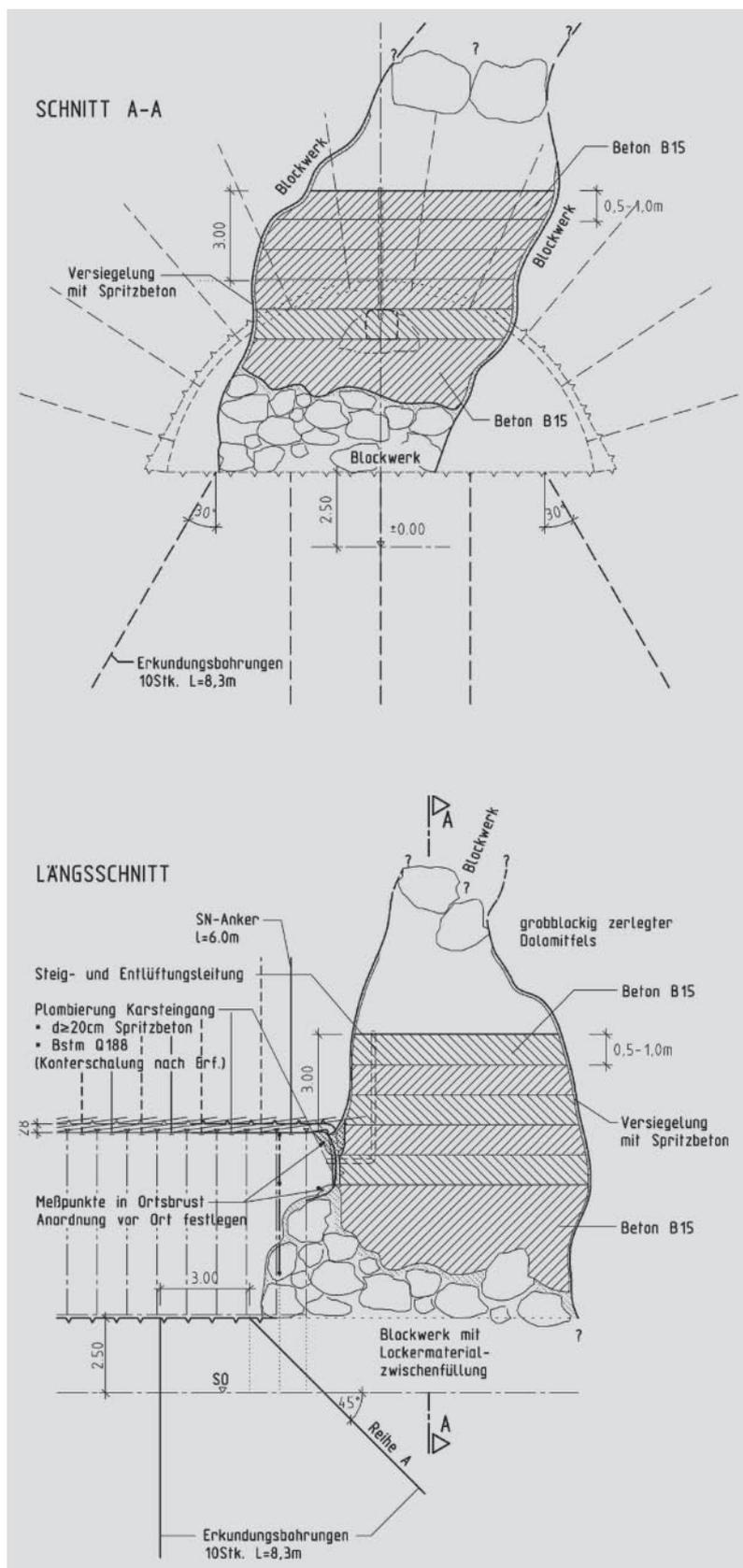
Für die dauerhafte Betriebssicherheit (Gebrauchstauglichkeit) sind Karststrukturen – Hohlräume, Auflockerungszonen/Versturzmassen und Karstfüllungen – im Nahbereich des Bauwerks relevant, wobei hierfür deren Art (verfüllt, teilverfüllt, offen), die Lage zum Bauwerk und deren Größe sowie die Ausbildung des Gebirges zwischen Bauwerk und Karststruktur ausschlaggebend sind. In der Regel sind die für die dauerhafte Betriebssicherheit maßgebenden Karststrukturen im Einflußbereich des Bauwerks kleiner als die für den Vortrieb relevanten.

Als Gefährdungsbilder wurden Karststrukturgrößen und -lagen in der Umgebung des Bauwerks definiert. Mit Hilfe von numerischen Untersuchungen wurde ermittelt, welche Karststrukturen in ihrer Größe und Lage Einfluß auf die Standsicherheit des Tunnels haben. Die Ergebnisse für den Tunnel Irlahüll der NBS Nürnberg-Ingolstadt zeigen, daß Hohlräume und Anomalien in der Umgebung der Tunnelröhre bis zu einer Tiefe von 15 m das Tragverhalten und damit die Gebrauchstauglichkeit beeinflussen. Die Grenzgrößen der bauwerksrelevanten Hohlräume sind im Bild 5 dargestellt. Darüber hinausgehend wurde ein Megahohlraum mit einem Durchmesser von 30 m definiert. Dieser erwies sich als bauwerksrelevant in einem Umgriff von drei Tunneldurchmessern.

Bei Felseinschnitten und Dämmen, die auf Fels gegründet sind, gelten ähnliche Randbedingungen wie bei Tunnelbauwerken: Art, Größe und Ausbildung etwaig angefahrener Verkarstungsstrukturen sowie das Vorhandensein offener Karsthohlräume unterhalb des Bauwerks. Eine zum Tunnel analoge Einflußmatrix mit der Größe und Entfernung der Karststrukturen zum Bauwerk wurde für Damm- und Einschnittsbereiche entwickelt (Bild 6). Da bei größeren offenen Klüften in der Felsoberfläche durch Materialausttrag das Gefährdungsbild Erdfallgefahr besteht, sind für den Bereich der offenen Strecke mit Lockergesteinsüberdeckung auch die Lage und Struktur der Felsoberfläche zu erkunden. In der Sohle von Felseinschnitten sind alle offenen Karststrukturen zu erfassen.

Die für die dauerhafte Gebrauchstauglichkeit relevanten und oftmals kleinflächigen Karststrukturen können aufgrund von erkundungstechnischen Grenzen erst nach den Baumaßnahmen, das ist das Auffahren des Tunnels, die Herstellung des Einschnitts oder der Gründungssohle für Dammbauwerke, zielgerichtet und wirtschaftlich erkundet werden.

Es sind folgende zusätzliche Erkundungen nach Herstellung der Baumaßnahme durchzuführen, um damit die dauerhafte Gebrauchs-



tauglichkeit des Fahrwegs nachweisen zu können:

- ⇨ Aufarbeiten und Bewertung der Erkundungs- und Auffahrungsergebnisse,
- ⇨ Indirekte Erkundung durch geophysikalische Verfahren,
- ⇨ Direkte Aufschlüsse durch Kontroll- und Referenzbohrungen sowie Kamerabefahrungen.

Bild 4 Maßnahme zur Bewältigung der Karststruktur beim Vortrieb des Tunnels.

Fig. 4 Measure to cope with the karst structure when excavating the tunnel.

Bild 5 Grenzgrößen der Karststrukturen mit Relevanz für die dauerhafte Betriebssicherheit im Tunnel Irlahüll.

Fig. 5 Limiting values of karst structures relevant for a lasting serviceability of the Irlahüll tunnel.

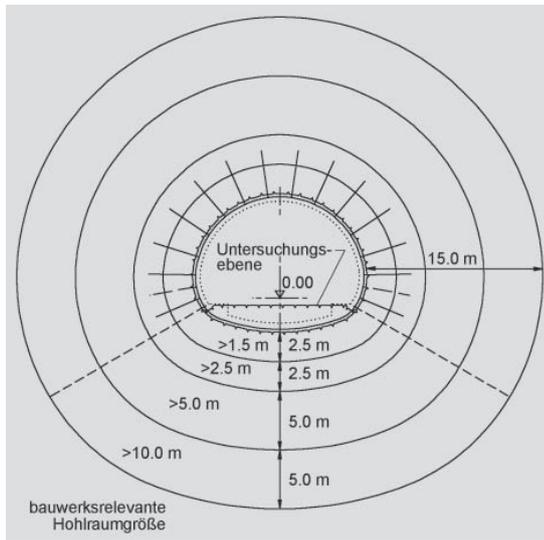
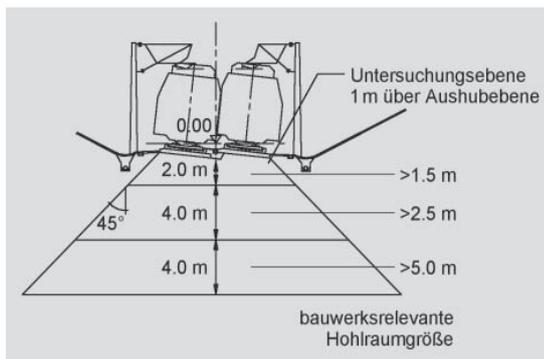


Bild 6 Grenzgrößen der Karststrukturen mit Relevanz für die dauerhafte Betriebssicherheit im Bereich Einschnitt.

Fig. 6 Limiting values of karst structures relevant for a lasting serviceability in the zone of the cut.



Das Ergebnis ist eine Abschätzung der bauwerksrelevanten Anomalien in Hinblick auf Größe, Ausmaße (Höhe, Länge, Breite), Lage und Entfernung zum Bauwerk. Alle diese Angaben werden orientiert zum Bauwerk im Rahmen der methodischen Grenzen gemäß dem Stand der Technik angegeben und dienen als Grundlage für die anschließenden Gebrauchstauglichkeitsnachweise.

Erkundung für die Herstellung der Bauwerke

Historische Erkundung

Im Rahmen der historischen Erkundung wurden mehr als 230 nationale und internationale Literaturquellen ausgewertet und hinsichtlich der oben formulierten Aufgabenstellung in zielführende, weiterführende, allgemeine und weitere Literaturquellen unterteilt. Für die ziel- und die weiterführende Literatur wurden stichwortartige Kurzfassungen ausgearbeitet. Die Auswertung der Literaturquellen ergab keine konkreten Hinweise auf historische oder rezente Erdfallerscheinungen oder bauwerksrelevante Karststrukturen im unmittelbaren Projektbereich.

Auf Grundlage der Auswertung der zahlreichen wissenschaftlichen Studien und Fallbeispiele zur Karstentstehung und den beschriebenen möglichen beziehungsweise bekannten Versagensmechanismen wurden konkrete Karsthohlraum- und Erdfallgefährdungsbilder für die NBS Nürnberg-Ingolstadt definiert.

Felderkundung im Vorfeld der Bauausführung
Im Rahmen des ersten und zweiten Erkundungsprogramms wurden zur Erkundung des generellen Aufbaus des Karstgebirges sowie zur Erfassung von für die Erstellung des Bauwerks relevanter Verkarstungsstrukturen folgende Erkundungsmaßnahmen durchgeführt:

- ◇ Kernbohrungen: Aufgrund der geotechnischen und hydrogeologischen Ausrichtung dieser Erkundungsprogramme waren die Kernbohrungen sowohl trassennah als auch zur Erfassung der großräumigen hydrogeologischen Verhältnisse trassenfern positioniert. Diese punktuellen Aufschlußergebnisse ergaben, daß das Gebirge sehr heterogen verkarstet ist und unverkarstete Bereiche unmittelbar in Verkarstungszonen übergehen. Zudem zeigten die Kernbohrungen eine Abnahme der Verkarstung von oben nach unten. Eine laterale Erfassung der einzelnen Verkarstungsstrukturen beziehungsweise genauere Aussagen über Art und Häufigkeit von Verkarstung im Gebirge waren anhand der ausgeführten Kernbohrungen nicht möglich.
- ◇ Luft- und Satellitenbildauswertungen: Die Luft- und Satellitenbilder zeichnen die Oberflächenstrukturen ab und gaben damit Hinweise auf mögliche Verkarstungen. In bezug auf tieferliegende bauwerksrelevante Verkarstungsstrukturen konnten aus den Luft- und Satellitenbildauswertungen keine konkreten Aussagen getroffen werden.
- ◇ Gerichtetes Bohrlochradar: Die Beschränkung auf dieses geophysikalische Verfahren beruhte auf den Erkenntnissen von 1988 durchgeführten Vergleichsmessungen zur Ermittlung von Verkarstungsstrukturen mittels geophysikalischer Verfahren im Rahmen der Erkundungsmaßnahmen für die ABS/NBS Plochingen-Günzburg (Refraktionsseismik, Geoelektrik, Elektromagnetik). Diese Messungen ergaben, daß es bedingt durch die zum damaligen Zeitpunkt vorliegende Versuchstechnik sowie den zur Verfügung stehenden Auswerteverfahren nicht möglich war, mit diesen Verfahren Verkarstungsstrukturen zu erfassen. Die durchgeführten Radarmessungen ergaben für den Bohrungsnahbereich eine gute Aussage über Größe und Vorkommen von Verkarstungsstrukturen, jedoch waren die Erkundungsreichweiten mit 10 bis 30 m relativ gering. Zur ganzheitlichen Erfassung von Verkarstungsstrukturen im Bereich des Tunnels Irlahüll wären, bedingt durch die gebirgsabhängigen Erkundungsreichweiten, Bohrungen und Messungen alle 20 bis 50 m erforderlich gewesen. Aufgrund der hieraus resultierenden Unwirtschaftlichkeit wurde von einem weiteren Einsatz dieses Verfahrens Abstand genommen.

Karstmorphologie

Im Rahmen der Feldarbeiten wurden die im Kartierstreifen liegenden karstmorphologischen Ob-

jekte (Dolinen, Dolinenreihen, Trockentäler, Karstsenken ohne oberirdischen Abfluß) in ihrer Lage und Ausdehnung dokumentiert. Unter Berücksichtigung geologischer, hydrogeologischer und karstspezifischer Randbedingungen und Gesetzmäßigkeiten ließen sich damit Trassenabschnitte ausweisen, in denen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für bauwerksrelevante Karststrukturen existiert.

Die Qualität der Ergebnisse war wesentlich von der gegebenen Aufschlußsituation abhängig. Das Fehlen von Hinweisen für eine starke Verkarstung konnte nicht ohne weiteres als risikomindernder Faktor angesehen werden. Die lokalen landschaftsprägenden Mechanismen waren stets bei der Interpretation der Morphologie zu berücksichtigen.

In die Kartierung wurden auch aus der Luftbildauswertung bekannte ältere Karststrukturen eingearbeitet. Aufgrund der Geländeänderungen waren diese teilweise heute nicht mehr nachvollziehbar. Teilweise mußten auch anthropogene Ursachen für die in der Luftbildauswertung ausgewiesenen Strukturen in Betracht gezogen werden. In einzelnen Fällen kann dies auch für die jüngst kartierten Strukturen gelten: Möglicherweise sind einzelne als „Erdfall vermutet“ ausgewiesene Strukturen durch Humusabschub entstanden.

Ergänzt wurde die Kartierung durch eine Zusammenstellung vorhandener Lineamentaus-

wertungen. Bei den Tunnelbauwerken läßt sich aus den Lineamenten allein noch keine Gefährdung durch Karst ableiten. Vielmehr müssen hier für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit die Ergebnisse der Tunneldokumentation und Ergebnisse von Karsterkundungsmaßnahmen für die Beurteilung der Gefährdung herangezogen werden. Auf der freien Strecke sind die Lineamente häufig im Bereich der Täler zu finden. Die Erdfallgefährdung kann in diesen Zonen erhöht sein, da die Täler häufig in Zonen mit geschwächtem Gebirgsverband angelegt wurden.

Erkundung zur Gewährleistung der dauerhaften Gebrauchsfähigkeit

Definition der karst- und erdfallgefährdeten Streckenbereiche

Die aus der ersten Erkundungsphase vorliegende Beschreibung der Verkarstung sowie die Luftbild- und Satellitenauswertung wurden unter Einbeziehung der während der Baumaßnahme erstellten geotechnischen und tunnelbautechnischen Dokumentationen ausgewertet und für die weiteren Bearbeitungsschritte zur Behandlung der Karst- und Erdfallproblematik aufbereitet. Der gesamten Strecke wurden darauf aufbauend vier Karstgefährdungszonen zugeordnet:

- ◇ Zone 0: kein verkarstungsanfälliges Gestein im Trassenbereich,
- ◇ Zone 1: Gebirge mit geringer Verkarstung,

Überraschung?

- Karsthohlräumerkundung
- Geophysikalische Exploration an der Oberfläche und in Tunneln
- Bohrlochmessungen für geotechnische Untersuchungen
- Optische und akustische Bohrlochscans (vertikal und horizontal)
- Tunnel- und Schachtvermessung
- Vibrations- und Erschütterungsmessungen und Gutachten

Mit integrierten geophysikalischen Interpretationen von DMT erfahren, was Sie erwartet.



Deutsche
Montan Technologie GmbH

Exploration & Geosurvey

Am Technologiepark 1
45307 Essen

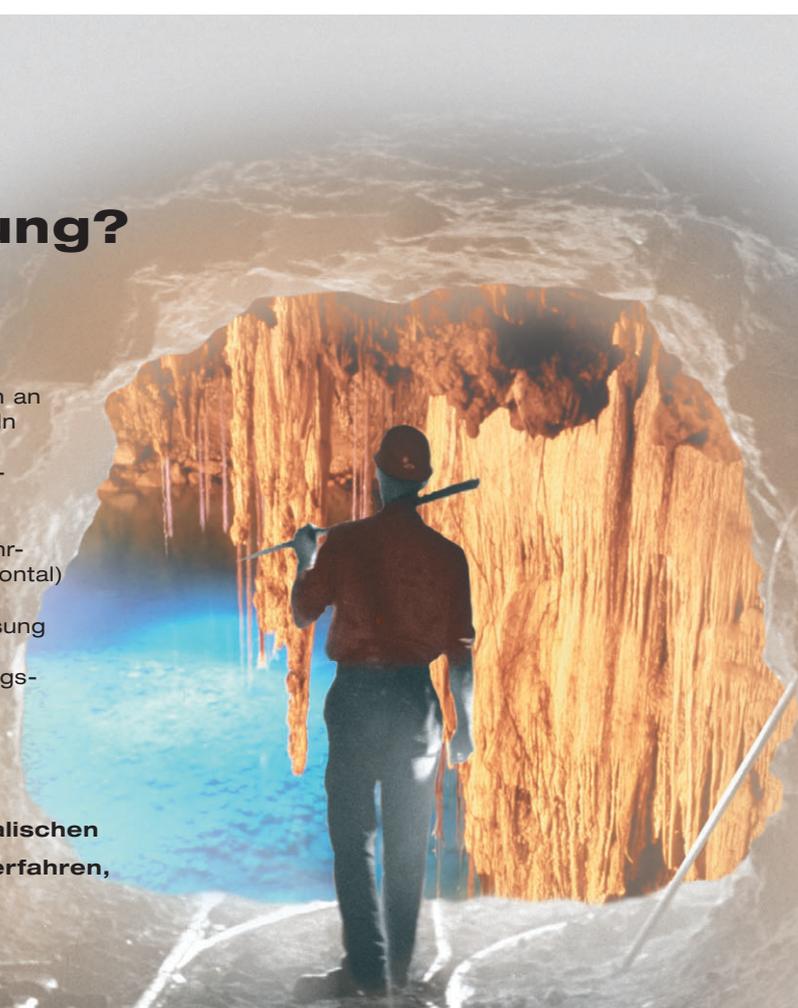
Telefon 02 01-1 72 19 70

Telefax 02 01-1 72 19 71

E-Mail exploration@dmtd.de

Internet www.dmt.de

DIN EN ISO
9001
zertifiziert



- ◇ Zone 2: kompaktes, tragfähiges Gebirge mit starker Verkarstung in allen Ausbildungsformen, von verfüllt bis unverfüllt,
- ◇ Zone 3: angewittertes bis verwittertes Gebirge mit sehr starker Verkarstung in allen Ausbildungsformen, von verfüllt bis unverfüllt; Karsterscheinungen an der Geländeoberfläche (Dolinen, Wannan).

Demnach erstreckt sich die für die Neubautrecke Nürnberg-Ingolstadt relevante Verkarstung vom Los Mitte, Tunnel Euerwang ab etwa Bau-km 55.600 in unterschiedlichen Gefährdungszonen bis zum südlichen Ende vom Los Süd (Bau-km 81.750). Aufbauend auf dieser Einteilung in Karstgefährdungszonen wurden die Bereiche festgelegt, in denen weitergehende Erkundungsmethoden angeordnet werden mußten, um den Nachweis der dauerhaften Gebrauchstauglichkeit zu erbringen.

Indirekte Verfahren

Geophysikalische Meßverfahren werden zu den indirekten Erkundungsmethoden gezählt (6, 7, 8). Sie erfassen unterschiedliche physikalische Eigenschaften des Untergrunds – elektrische Leitfähigkeit, Laufzeiten beziehungsweise Geschwindigkeiten von Schallwellen, Reflexionen von Schallwellen an physikalischen und geologischen Grenzflächen, Abweichungen vom Schwere- und Magnetfeld der Erde. Sowohl die Potentialverfahren (Goelektrik, Gravimetrie) als auch Wellenverfahren (Seismik, Georadar) werden in unterschiedlicher Art angewendet. Die Eignung eines jeden Verfahrens hängt von den Randbedingungen und der speziellen Aufgabenstellung ab. Bei der Anwendung geophysikalischer Untersuchungen ist zu berücksichtigen, daß die ständige Weiterentwicklung die Aussagekraft der Methode verbessert. Wesentlich bei der Beurteilung, ob Geophysik eingesetzt wird oder nicht, ist, daß die Methodik der Erkundung den ausführenden Firmen überlassen wird, die angebotenen Methoden jedoch anhand von Testfeldern mit bekannten Anomalien überprüft werden. Diese Vorgangsweise hat sich unter anderem für die Karsterkundungsarbeiten im Bereich der NBS Nürnberg-Ingolstadt bewährt, wo vor der letztendlich festgelegten Meßdurchführung ein umfangreiches methodisches Konzept von der ARGE Erkundung Karsthohlräume (Verbundplan Prüf- und Meßtechnik GmbH, DMT, Geophysik GGD, Geohydraulik Data, Daldrup AG) ausgeführt werden mußte.

Durch die Kombination verschiedener Verfahren, zum Beispiel Seismik mit Gravimetrie oder Goelektrik, kann die Aussagekraft erhöht werden. Aufgrund der stark wechselnden Randbedingungen – Tunnelprofil, Tunnelsohle mit und ohne Spritzbetonsohlgewölbe, Dammaufstandsfläche über Tertiärüberlagerungen, Dammschüttung, Einschnitte – ist es zielführend, in den Bereichen unterschiedliche Konzepte beziehungsweise Meßmethoden anzuwenden. Aus diesem Grund wurde

entschieden, die geophysikalische Erkundung redundant auszuführen; durch die Anwendung von zwei unterschiedlichen Meßverfahren ergeben sich Synergie- und Optimierungseffekte, welche die Prognosesicherheit der geophysikalischen Ergebnisse wesentlich steigern. Die Meßergebnisse wurden durch eine integrative Zusammenschau der Methoden (zum Beispiel Seismik und Gravimetrie) unter Würdigung zusätzlicher Unterlagen wie Felduntersuchungen, Karstmorphologie, historische Erkundung und der geologischen Dokumentation aus dem Vortrieb der Tunnel beziehungsweise dem Auffahren des Einschnitts interpretiert. Um bei der Beurteilung der Seismik einen maximalen Informationsgewinn zu erzielen, wurde ein seismischer Hohlraumverdachtsfaktor (9) entwickelt, der als statistisch-analytischer Zusammenhang zwischen seismischer Geschwindigkeit, seismischer Refraktortiefe und Störampplitude zu verstehen ist. Basis für die Beurteilung der Goelektrik (BEAM) in bezug auf Verdachtsflächen ist der Frequenzeffekt. Die Beurteilung auffälliger Anomalien (Verdachtsflächen) erfolgte unter Einbeziehung aller Teilergebnisse und beschränkte sich nicht auf die Bewertung eines Parameters, zum Beispiel des Hohlraumverdachtsfaktors. Das Ergebnis der indirekten Erkundung waren Verdachtsbereiche, die in schriftlicher und planlicher Form dargestellt wurden (10).

Im folgenden werden die angewandten Verfahren kurz vorgestellt und im Hinblick auf ihre Vor- und Nachteile für die Karst- und Erdfallproblematik beschrieben:

► Seismische Verfahren: Mit seismischen Verfahren werden die Laufzeiten von Schallwellen und deren Reflexionen und/oder Refraktionen im Untergrund gemessen. Je nach Meßanordnung und Auswerteprozedur unterscheidet man verschiedene Verfahren (Reflexionsseismik, Refraktionsseismik, seismische Tomographie, Tunnelseismik).

Seismische Verfahren erlauben generelle Aussagen zum Gebirgsaufbau (zum Beispiel Schichtgrenzen, Übergang Locker- zu Festgestein, Störungszonen, Störkörper). Bei der Anwendung im Tunnel wird der Sohlbereich gleichmäßig abgerastert. Als seismische Quelle werden mechanische Fallgewichte und Hammerschlag eingesetzt.

Aus der Betrachtung von Tiefe und Verlauf der Refraktoren, der seismischen Wellengeschwindigkeiten, sowie von Änderungen im seismischen Wellenbild ergeben sich Rückschlüsse auf geologische Inhomogenitäten, zum Beispiel Karststrukturen und Gebirgsschwächezonen. Um die Interpretation der seismischen Ergebnisse auf eine quantitative Basis zu stellen, wird aus den Ergebnissen der seismischen Untersuchungen der Hohlraumverdachtsfaktor berechnet, welcher der Interpretation der Meßergebnisse in bezug auf Hohlraumverdacht zugrunde liegt. Folgerichtig würde ein erhöhter Hohlraumver-

dacht auf bauwerksrelevante (größere, unverfüllte) Karsthohlräume schließen lassen.

► **Fokussierende Geoelektrik:** Die fokussierende Geoelektrik nach BEAM (Bored-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring) beruht auf der synchronen Einspeisung elektrischer Ströme über gleichpolige Elektroden (11, 12). Im Tunnel wird die Außenschale verwendet, um einen Schirmstrom in das Gebirge einzubringen. Der Schirmstrom erzwingt eine Fokussierung des Meßstroms, der punktförmig in das Gebirge geleitet wird. Auf diese Weise können die elektrischen Eigenschaften im Tunnelumfeld bestimmt werden.

Das Ergebnis der Untersuchungen ist der Frequenzeffekt als Maß für die (scheinbare) Polarisierbarkeit des Gebirges. So sind direkte Hinweise auf luftgefüllte Hohlräume abzuleiten.

Wesentlich für den erfolgreichen Einsatz der Methode sind die Einspeisung des Schirmstroms und damit die Außenschale, deren Eignung im Vorfeld der Messungen zu prüfen ist. Weiterhin kann es durch Streu- beziehungsweise Störströme im Tunnel zur negativen Beeinflussung der Daten kommen.

► **Mikrogravimetrie:** Mit hochsensiblen Meßgeräten (sogenannten Gravimetern) werden Störungen (Anomalien) der global wirkenden Schwerebeschleunigung gemessen. Schwerestörungen werden unter anderem durch Dichtedifferenzen im Untergrund verursacht. Die Messungen erfolgten im Bereich der Tunnelstrecke in einem äquidistanten Raster. Nach dem Meßvorgang müssen rechnerische Korrekturen hinsichtlich der umliegenden Massen (im Tunnel und in der Überlagerung) durchgeführt werden, um Rückschlüsse auf lokale Dichteminima und damit mögliche Hohlräume unterhalb der Tunnelsohle ziehen zu können. Das Ergebnis der Gravimetrie ist die Karte der Bougueranomalie. Die Interpretation möglicher Hohlräume erfordert die Abtrennung des Meßwerts in einen Regional- und Lokalanteil. Aus der sogenannten lokalen Anomalie können qualitativ hohlräumverdächtige Bereiche bestimmt werden. Breite und Amplitude von Anomalien ermöglichen eine erste Abschätzung von Größe, Tiefenlage und Geometrie

eines potentiellen Hohlraums. Größere unverfüllte Hohlräume sollten sich aufgrund des hohen Dichtekontrastes zu dem umgebenden Gestein als Anomalien erkennen und orten lassen. Als mikrogravimetrische Anomalie können sowohl geologische Strukturen wie Gesteinsgrenzen (zum Beispiel Festgestein-Lockergestein) als auch größere verfüllte Hohlräume und aufgelockerte Bereiche im Gebirge (aufgeweitete und zum Teil oder vollständig verfüllte Klüfte) lokalisiert werden. Strukturen im Firstbereich werden bedingt gemessen, da Hohlräume „über Kopf“ sich als Dichtemaxima darstellen. Das Verfahren ist auch in Bereichen wie Dammaufstandsflächen, geschütteten Dämmen und fertigen Sohlen anwendbar.

Die Gravimetrie ist relativ anfällig gegen Störungen wie Erschütterungen, verursacht durch Verkehr. Die Methode ist den Potentialmethoden zuzurechnen und unterliegt demnach der Mehrdeutigkeit. Eine Schwereanomalie kann sowohl durch größere verfüllte als auch kleinere unverfüllte Hohlräume unterhalb der Meßfläche oder ein Schweremaximum oberhalb der Meßfläche verursacht werden.

Direkte Verfahren

Da mit geophysikalischen Verfahren zwar Störungen und Anomalien der Gebirgsstruktur ermittelt werden, über die letztendliche Ausbildung dieser Strukturen aber aufgrund der physikalischen Grenzen der indirekten Verfahren keine eindeutigen Aussagen zu erlangen sind, werden nach der Durchführung der geophysikalischen Messungen alle dabei als geophysikalische Anomalien ermittelten Hohlraumverdachtsflächen mit direkten Methoden, Kern- oder Hammerbohrungen mit anschließender Kamerabefahrung, weitergehend untersucht. Die Anzahl der durchzuführenden Kernbohrungen wird von der Anzahl der angetroffenen geophysikalischen Anomalien sowie von deren in den Bohrungen ermittelten Struktur und Ausbildung bestimmt. Ergibt sich anhand der Bohrungen, daß gleichartige Anomalieflächen auch vergleichbare Karststrukturen darstellen, so kann aufgrund dieser Tatsache auf eine detail-

TUNNELBAU MIT JÄGER

EFFIZIENT UND WIRTSCHAFTLICH MIT MODERNSTER TECHNOLOGIE

Jäger Baugesellschaft mbH • Batloggstraße 95 • A-6780 Schruns/Österreich
Telefon (43)-(0)5556/7181-0 • Telefax (43)-(0)5556/7181-31

JÄGER

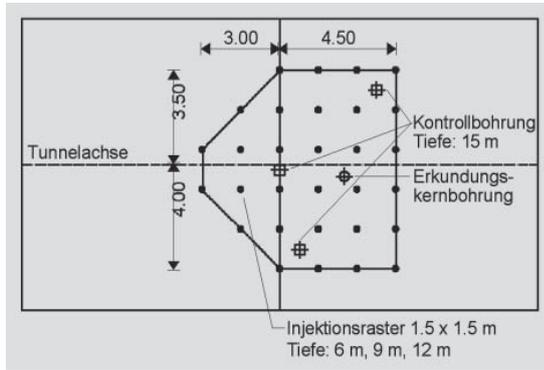


Bild 7 Ertüchtigungskonzept: Injektionsraster.

Fig. 7 Improvement concept: grouting grid.

lierte Bohrerkundung jeder Anomaliefläche verzichtet werden. Statt dessen sind dann bei gleichartigen Anomalieflächen nur noch stichprobenartige Kontrollbohrungen erforderlich. Neben den Kontrollbohrungen in den ausgewiesenen Anomalien werden Referenzbohrungen in Bereichen angeordnet, in denen keine Anomalien ausgewiesen sind, um die geophysikalischen Methoden damit auch negativ zu verifizieren.

Im Tunnelprofil können die Ankerbohrungen, welche im Regelfall in einem 2 m x 2 m Raster 6 m bis 8 m tief angeordnet werden, zur Beurteilung der Ergebnisse der geophysikalischen Methoden als direkte Aufschlüsse mit herangezogen werden.

Maßnahmen

Maßnahmen für den Vortrieb

Auf Basis der Gefährdungsbilder wurden Maßnahmen geplant und ausgeschrieben, die zur erfolgreichen Bewältigung von Karststrukturen beim Vortrieb führen. Die Standsicherheit des Tunnels unter Berücksichtigung dieser Maßnah-

men wird richtlinienkonform beziehungsweise normgerecht nachgewiesen.

Maßnahmen für die dauerhafte Betriebssicherheit

Der Untergrund wurde in fünf Hohlraumbewertungsklassen eingeteilt. In den Hohlraumbewertungsklassen 1 und 2 wurde der Baugrund ertüchtigt. Unter Berücksichtigung der Ertüchtigungsmaßnahmen und der dadurch neuen Boden- beziehungsweise Gebirgskennwerte wurden die Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise durchgeführt.

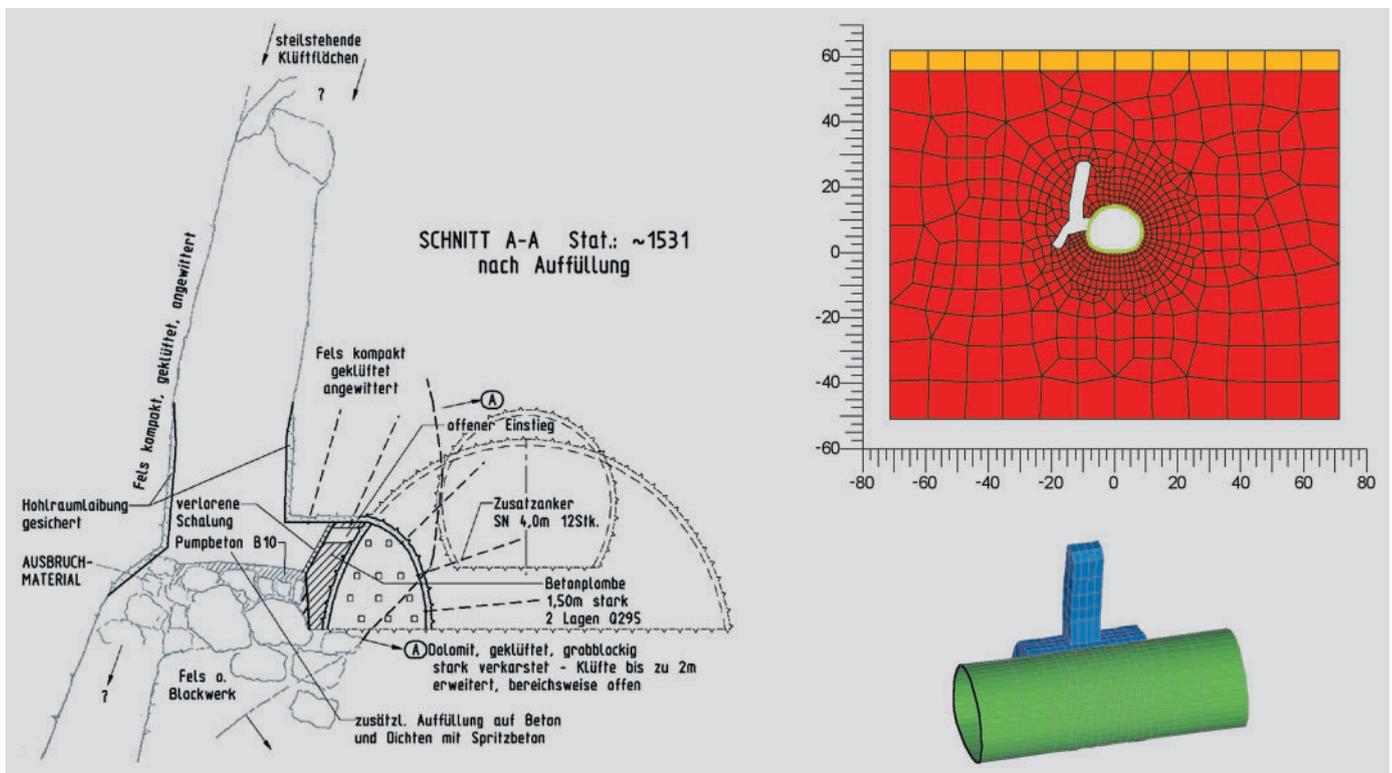
Im Regelfall bestand das Ertüchtigungskonzept in einer Verfüllung der Karststrukturen mittels Injektionen. Dabei wurden folgende wesentliche Ziele verfolgt:

- ◊ Satte Verfüllung der Hohlräume, um ein Nachsacken zu verhindern,
- ◊ Verfestigung der vorhandenen Verfüllung zur Gewährleistung einer stabilen Bettung für die Innenschale,
- ◊ Erzielung eines erosionsstabilen Materials, damit ein Auslaufen der vorhandenen Füllung in möglicherweise tieferliegende Spalten verhindert wird.

Die Injektionsmaßnahmen erfolgten in den Anomaliebereichen, die mit den geophysikalischen Verfahren ermittelt und durch Bohrungen und Kamerabefahrungen quantifiziert und bestätigt wurden. In einem Raster zwischen rund 1,5 m x 1,5 m und 2 m x 2 m wurden Injektionsbohrungen in der Sohle bis in eine Tiefe von 10 m, mindestens jedoch bis zum Antreffen von Fels abgeteufelt (Bild 7). Das Injektionsgut wurde den örtlichen Verhältnissen so angepaßt, daß ein optimaler Injektionserfolg erzielt wurde. Zur Verifizierung der Maßnahme wurden Kon-

Bild 8 Numerisches Modell der Karststruktur im Tunnel Irlahüll.

Fig. 8 Numeric model of karst structure in the Irlahüll tunnel.



trollbohrungen angeordnet. Nach Bestätigung der erfolgreich durchgeführten Maßnahme erfolgte der Nachweis der Betriebssicherheit unter Berücksichtigung der angetroffenen Baugrundverhältnisse und der Ertüchtigungsmaßnahme.

Alternativ zur Ertüchtigung des Baugrunds war es vereinzelt aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll, eine Verstärkung im Ausbau (Innenschale) anzuordnen. Diese Verstärkung der Innenschale resultierte aus einer durch die Karststruktur erhöhten Last auf die Innenschale. Die Gebirgslast auf die Innenschale wurde unter Ansatz der in diesem Bereich zutreffenden Bodenkennwerte und der realistischen numerischen Modellierung der Karststruktur ermittelt (Bild 8). Die Dimensionierung des Tunnelausbaus erfolgt auch in diesem Fall richtlinienkonform unter Berücksichtigung der durch die Karststruktur gegebenen geometrischen und geotechnischen Randbedingungen.

In der Hohlrumbewertungskategorie 3 werden die Anomalien quantifiziert, die Entscheidung über die weitere Vorgehensweise ist festzulegen. In der Hohlrumbewertungskategorie 4 und 5 sind keine Ertüchtigungsmaßnahmen erforderlich. Die Boden- beziehungsweise Gebirgskennwerte, wie sie im nicht bis gering verkarsteten Bereich zutreffend sind, werden zur Dimensionierung des Bauwerks herangezogen.

Quellennachweis

1. Meyer, R.K.F. ; Schmidt-Kaler, H.: *Wanderungen in die Erdgeschichte. Durchs Urdonaul nach Eichstätt*. München: Verlag Friedrich Pfeil, 1991.
2. Apel, R.: Hydrogeologische Untersuchungen im Malmkarst der Südlichen und Mittleren Frankenalb. In: *Geologica Bavarica* 64 (1971), 268-355.
3. DB AG: *Richtlinie 836, Erdbauwerke planen, bauen und instandhalten*. 1999.
4. DB AG: *Richtlinie 820, Grundlagen des Oberbaus*. 2000
5. DB AG: *Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn*. 3. überarbeitete Auflage 1995
6. Althaus, P. ; Kühne, M. ; Lehmann, B.: *Ingenieurgeophysikalische Untersuchungen im Tunnelbau*. Taschenbuch für den Tunnelbau. S. 75-122. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 2000.
7. Althaus, P. ; Räckers, E.: Einsatzmöglichkeiten der Geophysik. In: *Felsbau* 16 (1998), Nr. 5. S. 289-299.
8. Dickmann, T. ; Lorenz, K.: Tunnelbegleitende Vorauserkundung im Lockergestein. In: *Felsbau* 16 (1998), Nr. 4, S. 256-257.
9. Verbundplan Prüf- und Meßtechnik GmbH: *Die Entwicklung eines seismischen Hohlraumverdachtsfaktors zur Beurteilung von Karststrukturen*. Unveröffentlicht, 2001.
10. ARGE Erkundung Karsthöhlräume: *Berichte zur Karsterkundung NBS Nürnberg-Ingolstadt*. Unveröffentlicht, 2001/2002.
11. Kaus, A. ; Kopp, Th.: *Geoelektrisches Vorauserkundungsverfahren für Hohlraumvortrieb*. Deutsche Patentanmeldung, Offenlegungsschrift DE 198 42 975 A 1, 1998.
12. Kaus, A. ; Kopp, Th.: *Geoelectric Pre-Prospecting Method (Geoelektrisches Vorauserkundungsverfahren)*. Internationale Patentanmeldung, Veröffentlichungsnummer: WO 00/17489, 2000.

Autoren

Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Pöttler, ILF ZT Gesellschaft mbH, Framsweg 16, A-6020 Innsbruck, Österreich, E-Mail rudolf.

Im Jahr 2003 ist für die Ausgabe 1 der Zeitschrift *Felsbau* ein Themenheft zur Karstproblematik mit weiterführenden Beiträgen unter anderem mit folgenden Themen geplant:

- ◇ Vortrieb im Karst aus tunnelbautechnischer und vertraglicher Sicht
- ◇ Die organisatorische Abwicklung der Erkundung und Beherrschung der Karst- und Erdfallproblematik
- ◇ Grundlegende Vorarbeiten zur Erfassung der geologischen und hydrologischen Situation
- ◇ Geophysikalisches Untersuchungskonzept und Ergebnisse
- ◇ Indirekte und direkte Karst- und Erdfallerkundung aus Sicht des Prüfenieurs und der Überwachung
- ◇ Statische Überlegungen zum Einfluß der Verkarstung auf die Tunnel- und Bauwerksstabilität in Abhängigkeit von der Gesamtgebirgsqualität
- ◇ Konstruktive Maßnahmen zur Einhaltung der Anforderungen für die Feste Fahrbahn in karst- und erdfallgefährdeten Bereichen

poettler@ibk.ilf.com, Dipl.-Ing. Volkmar Schneider, DB Projekt Verkehrsbau, Oedenberger Straße 55, D-90491 Nürnberg, Deutschland, E-Mail Volkmar.Schneider@PBDE.de, Dr.-Ing. Erich Rehfeld, Baugrund Dresden Ingenieurgesellschaft mbH, Paul-Schwarze Straße 2, D-01097 Dresden, Deutschland, E-Mail Baugrund.Dresden@t-online.de, Professor Dipl.-Ing. Hubert Quick, Prof. Dipl.-Ing. Quick Ingenieure und Geologen GmbH, Groß-Gerauer Weg 1, D-64295 Darmstadt, Deutschland, E-Mail q@quick-ig.de



Verbundplan
Prüf- und Meßtechnik



Geophysik



Materialtechnologie



Geotechnik




Firmensitz Salzburg
Rainerstr. 29
A-5020 Salzburg
Tel: +43-662-8682-22320
Fax: +43-662-8682-1-22320

Geschäftsstelle Kaprun
Kesselfallstraße 344
A-5710 Kaprun
Tel: +43-6547-7151-0
Fax: +43-6547-7151-3250

Geschäftsstelle Strass
Materialversuchsanstalt
A-6261 Strass Nr. 103
Tel: +43-5244-63494
Fax: +43-5244-61275