

Baugrunderkundung für Verkehrswege in Karstgebieten

Von Klaus-Dieter Höwing, Stefan Eder und Marcus Plank

Die NBS Nürnberg-Ingolstadt durchfährt etwa von Bau-km 49,0 (Albtrauf, Nordportal Tunnel Euerwang) bis Bau-km 84,0 (Ingolstädter Senke nördlich Ingolstadt) die Südliche Frankenalb. Die Basis dieses Gebirgskomplexes bilden die nicht verkarstungsfähigen Sand- und Tonsteine des Braunen Juras. Ab der südlichen Tunneleingangsstrecke des Tunnels Euerwang (Bild 1) durchfährt die NBS die Gesteine des Weißen Juras. Diese Gesteine dominieren, mit einer Mächtigkeit von über 500 m, lithologisch die Südliche Frankenalb. Im Durchfahrungsgebiet der Schichtabfolgen des Weißen Juras stehen dabei bis zur nördlichen Tunneleingangsstrecke des Tunnels Irlahüll gering bis nicht verkarstungsfähige Gesteine des Unteren Weißjuras (Oxford und Unterer Kimmeridge) an. Im restlichen Streckenabschnitt bis Ingolstadt bilden stark bis sehr stark verkarstungsfähige Kalk- und Dolomitsteine des Mittleren und Oberen Weißjuras den Albkörper. Die Untergrundverhältnisse sind hier durch Verkarstung geprägt.

Die verkarsteten Gesteine stehen im Trassenbereich sowohl oberflächennah unter geringmächtiger quartärer Überdeckung als auch erst im tieferen Untergrund unter bis zu 30 m mächtiger tertiärer Lockergesteinsüberdeckung an.

Da die Kalk- und Dolomitsteine des Weißen Juras zum einen unterschiedlich verkarstungsanfällig sind und zum anderen auch bei gleicher Verkarstungsanfälligkeit lokal unterschiedlich

stark von der Verkarstung betroffen sind, sind die Gebirgsverhältnisse hier durch eine heterogene Abfolge von Verkarstungsstrukturen unterschiedlichster Art und Größenordnung und unverkarsteten, massiven Gebirgsbereichen gekennzeichnet.

Das heterogene Gebirge wird von den Tunneln Irlahüll (mit 7 260 m der längste NBS-Tunnel im verkarsteten Gebirge), Stammham und Geisberg sowie in den Felseinschnitten im Köschinger Forst durchfahren. In den übrigen Trassenabschnitten wird dieses unter unterschiedlich mächtiger Lockergesteinsüberdeckung anstehende verkarstete Gebirge von der Trasse in Damm- und Einschnittslage sowie im oberflächennah liegenden Tunnel Denkendorf überfahren.

Entstehung und Ausbildung des Karstgebirges

Die im tropischen Jurameer abgelagerte Schichtabfolge des Weißen Juras beginnt im Liegenden mit den wechselnd mergelsteinreichen, gebankten Kalksteinen des Oxford und des Unteren Kimmeridge (1, 3). Diese beiden Schichtabfolgen sind aufgrund ihres Mergelsteinanteils nur gering verkarstungsanfällig und bilden die Verkarstungsbasis der Weißjuragesteine.

Die darüber liegenden Schichtabfolgen des Weißjuras sind nahezu mergelsteinfrei und bestehen aus weitgehend dolomitisierten massigen Riffkalken sowie Bankkalken, die in den zwischen

Ground Reconnaissance for Traffic Routes in Karst Areas

Karstic underground conditions constitute a danger to all kinds of infrastructure, both on the surface and subsurface due to the heterogeneous rock mass conditions. The intensity of karstification depends on the lithology, the local tectonic and hydrologic situation and on the sedimentation development. These underground conditions demand suitable survey and reconnaissance methods, taking into account the specific demands of each project. Especially modern high-speed railway tracks are sensitive to soil movements, requiring very detailed soil investigations and a thorough risk management. The following paper describes the soil investigation before and during the construction works as well as the geological risk assessment of the new Nuremberg-Ingolstadt high-speed railway line.

Verkarstetes Gebirge als Baugrund kann aufgrund seiner vielfältigen Ausbildung Gefährdungspotenziale unter-

schiedlichster Art sowohl für übertägige als auch für untertägige Bauwerke beinhalten. Die Intensität der Verkarstung sowie die Art und Ausbildung der auftretenden Karststrukturen sind dabei von der jeweiligen Lithologie des Karstgebirges, den lokalen tektonischen und hydrogeologischen Verhältnissen sowie der Karstentwicklung abhängig. Zur Erfassung solch heterogener, durch Verkarstung beeinflusster Untergrundverhältnisse sind angepasste Erkundungsmethoden erforderlich, wobei diese in Bezug auf Art, Umfang und zeitliche Abfolge auf das jeweils zu erstellende Bauwerk abzustimmen sind.

Besonders setzungsempfindliche Linienbauwerke wie eine Hochgeschwindigkeitsstrecke mit dem Fahrwegsystem Feste Fahrbahn erfordern zur geotechnischen Risikobeurteilung eine sehr genaue Kenntnis der Untergrundverhältnisse im Einflussbereich des Bauwerks. Im nachfolgenden Beitrag werden die Baugrunderkundung vor und während der Bauarbeiten sowie die ingenieurgeologische Risikobeurteilung an der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt erläutert.

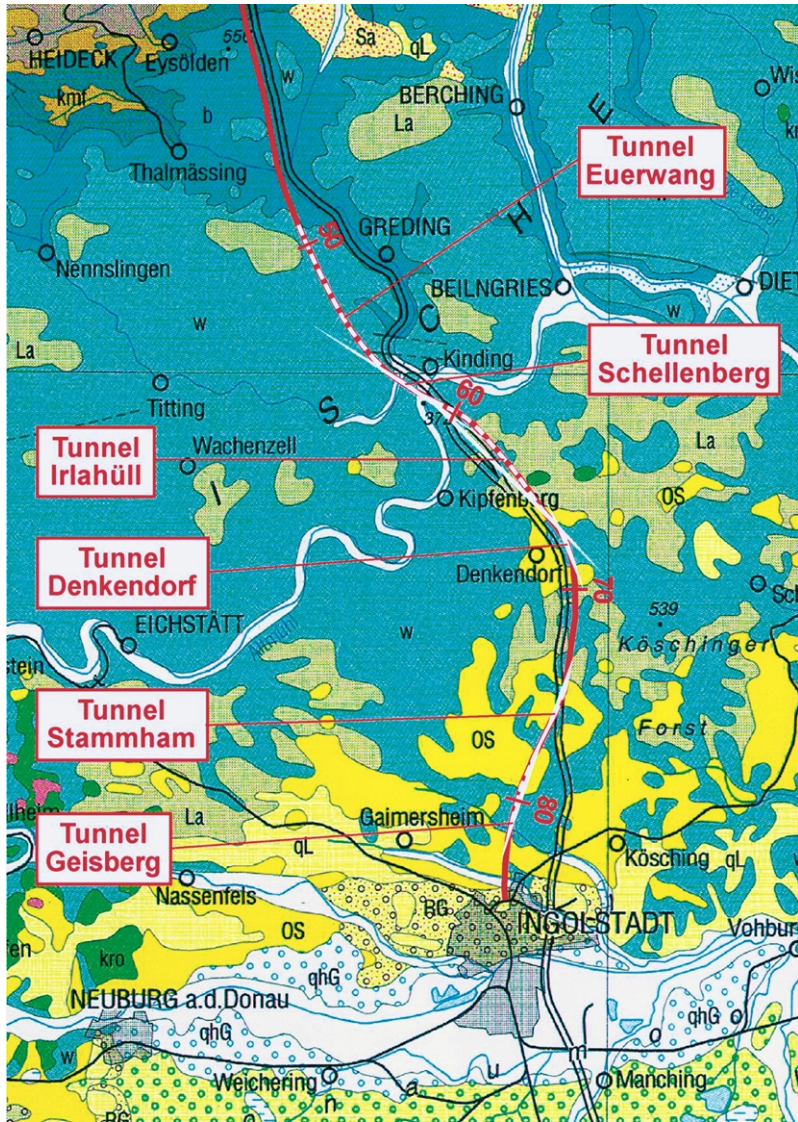


Bild 1 Geologische Übersichtskarte des Projektgebiets. OS – Tertiär, Obere Süßwassermolasse; b – Brauner Jura; w – Weißer Jura (5).
Fig. 1 Geological survey map of the project area. OS – Tertiary, Upper Freshwater Molasse; b – Brown Jurassic; w – Upper Jurassic (5).

den Riffkörpern liegenden Flachwasserwannen abgelagert wurden (Kimmeridge und Tithon).

Nach dem Zurückweichen des Jura-Meers unterlagen die Kalk- und Dolomitsteine des Weißen Juras über den sehr langen Zeitraum vom Beginn der Kreidezeit bis zum Jungtertiär (etwa 120 Mill. Jahre lang) unter tropischen bis subtropischen Bedingungen der intensiven Verkarstung und Erosion. Die Verkarstung erfolgte dabei nicht kontinuierlich, sondern schubweise, wobei langanhaltende Verkarstungsphasen durch kürzere Sedimentationsphasen – in der Unteren Oberkreide vor etwa 100 Mill. Jahren und im Tertiär vor etwa 15 Mill. Jahren – unterbrochen wurden. Während der langanhaltenden Verkarstungsphasen in der Kreide und im Tertiär wurde das Gebirge stark verkarstet. Es entstanden große Talsysteme sowie ein Karstrelief mit bis zu 100 m tiefen Karststrukturen an der Geländeoberfläche (Wannen, Dolinen, Schächte und Spalten). Des Weiteren entstanden jeweils in Abhängigkeit von den vorliegenden Vorflutsystemen weitverzweigte Höhlensysteme. Die Verkarstung erfolgte jedoch nicht einheitlich. Bei den Kalksteinen bewirkte die Verkarstung vornehmlich eine Erweiterung der Klüfte. In den Dolomitsteinen erfolgte

die Verkarstung lokal sehr unterschiedlich, wobei besonders in tektonisch stark gestörten Gebirgsbereichen die Verkarstung sehr tiefgründig und intensiv wirkte. Als Folge davon entstand ein sehr heterogenes Gebirge, in dem Karststrukturen unterschiedlichster Art und Größenordnung innerhalb unverkarsteter Bereiche wahllos verteilt auftreten.

In den Sedimentationsphasen wurde jeweils das während der vorherigen Verkarstungsphase entstandene Karstrelief verschüttet und aufgefüllt. Des Weiteren erfolgte eine Plombierung der existierenden Karsthohlräume. Wie Sackungsstrukturen in den Verfüllmaterialien von größeren Karsthohlräumen sowie paläontologische Untersuchungen belegen, erfolgte die Auffüllung von Karsthohlräumen mehrphasig. Das bedeutet, dass auch einmal verfüllte Karststrukturen später wieder mit in den Verkarstungsprozess einbezogen wurden und es so durch Lösungen im Gebirge unterhalb der Karststruktur zu Nachsackungen in der Karstfüllung, verbunden mit einer nachfolgenden Auffüllung kam.

Im trassenrelevanten Bereich erfolgte nach der letzten großen Verkarstungsphase im Alttertiär im Jungtertiär eine etwa 5 Mill. Jahre dauernde Sedimentationsphase, in der in diesem Gebiet das Karstrelief von den Lockergesteinen der oberen Süßwassermolasse (im Trassenbereich vorwiegend bindige Lockergesteine) überdeckt wurde. Zudem wurden während dieser Phase die vorher existierenden Karsthohlräume weitgehend plombiert, wobei oberflächennah von einer vollständigen Plombierung dieser Karsthohlräume auszugehen ist. Tiefliegende Karsthohlräume, besonders wenn sie bedeutsame Grundwasserwegigkeiten darstellten, wurden von der Plombierung nur teilweise erfasst.

Nach der Ablagerung der oberen Süßwassermolasse setzte wiederum Verkarstung ein. Aufgrund von Klimaveränderungen mit zunehmend kälteren Klimabedingungen war diese Verkarstung jedoch nicht mehr stark wirksam. Diese Verkarstung führte besonders bei Dolomitgesteinen zur Ausbildung von Verwitterungszonen, die dort, wo diese Gesteine von bindigen tertiären Lockergesteinen überlagert sind, heute noch erhalten sind.

Seit dem Ende des Tertiärs erfolgte aufgrund der verstärkten Taleintiefungen der Altmühl und der Donau ein Absinken des Grundwasserspiegels im Karstgebirge. In dessen Folge wurden ältere Karststrukturen durch zirkulierende Grundwässer teilweise ausgeräumt und reaktiviert. Ausdruck dieser Vorgänge ist das Vorhandensein der in jüngster geologischer Vergangenheit entstandenen Dolinen auf der Albhochfläche. Da die quartären Grundwasserströmungssysteme mit ihren meist relativ kleinen Einzugsgebieten aber bisher nur lokal in der Lage waren, die Plombierung des Karsts wieder zu entfernen, sind sowohl die Karststrukturen des tertiären

Karstreliefs auf der Hochfläche als auch die Karsthohlräume im Gebirge zum überwiegenden Teil verfüllt geblieben. Offene, ausgeräumte Karsthohlräume treten verstärkt in talrandnahen Lagen und im Bereich von Dolinen mit aktiven Schlucklöchern (Ponore) auf. Daneben existieren aber auch vereinzelt tiefliegende offene Karsthohlräume, die vermutlich nicht in die tertiäre Plombierung mit eingezogen waren und die auch heute noch eine bedeutende Rolle für den Karstgrundwasserhaushalt spielen. Die Speisung solcher tiefliegender wasserführender Karsthohlräume erfolgt über mehr oder minder vertikal orientierte offene Karststrukturen.

Das heutige Bild der Südlichen Frankenalb ist geprägt durch weite Albhochflächen sowie vereinzelt in diese tief und steil eingeschnittene Flusstäler. Auf den Albhochflächen sind keine ausgedehnten oberirdischen Entwässerungsnetze ausgebildet. 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.

In den Gesteinen des Weißen Juras ist ein Karst- bis Kluftgrundwasservorkommen entwickelt. Der Grundwasserspiegel des Karstaquifers liegt dabei im überwiegenden Durchfahrungsbe- reich der Südlichen Frankenalb tief unterhalb der NBS-Trasse (bis zu 60 m).

Lediglich in der nördlichen Tunneleingangsstrecke des Tunnels Irlahüll sowie der südlichen Tunneleingangsstrecke des Tunnels Geisberg tangiert die Trasse den Karstaquifer. Südlich des Tunnels Geisberg liegen im Karstaquifer unter tertiärer Überlagerung gespannte Grundwasser- verhältnisse vor. Im Streckenabschnitt vom Tunnel Irlahüll bis zum Tunnel Geisberg sind in der hier anstehenden, bis zu 30 m mächtigen tertiären Überlagerung lokal schwebende Grundwasservorkommen ausgebildet. Diese entwässern entweder oberirdisch oder vereinzelt über Dolinen in den Karstaquifer (2).

Gefährdungen durch Karststrukturen

Aus den unterschiedlichen geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen lassen sich für Bauwerke in Karstgebiete generell folgende Gefährdungsbilder ableiten:

- ⇨ Materialausträge (Erdfälle im engeren Sinn): Materialausträge erodierbarer Böden in den verkarsteten Un-

tergrund können Suffosionserdfälle bewirken. Das dabei entstehende Materialdefizit im Karsträgergebirge führt zu Setzungsvorgängen an der Geländeoberfläche. Wenn diese Setzungsvorgänge durch steife, bindige Horizonte verhindert werden, kann es zur Bildung von größeren Auflockerungen oder Hohlräumen auch im Karstdeckgebirge kommen. Bei einem schlagartigen Versagen derartiger Materialbrücken können plötzliche Setzungen an der Oberfläche auftreten.

- ⇨ Instabilität von Hohlräumen: In Streckenabschnitten, in denen das Bauwerk direkt auf den verkarsteten Untergrund gegründet wurde (Einschnitte), und in den Tunnelbauwerken gilt das Gefährdungsbild kollabierender Hohlräume mit einer bauwerksrelevanten Größe innerhalb einer kritischen Entfernung zum Bauwerk (7). Die Hohlräume im Karsträgergebirge können durch Nachbrechen ihrer Decken im Lauf der Zeit in Richtung Geländeoberfläche wandern. Kommt es zum Einsturz eines derartigen Hohlraums und zum Nachbrechen des Karstdeckgebirges, spricht man von Kollapserdfällen. Resultat derartiger Prozesse an der Geländeoberfläche sind Trichterdolinen.
- ⇨ Erosion in Karststrukturen: Durch die Mobilisierung von Hohlraumfüllungen im Einflussbereich des Tunnelbauwerks infolge einer Veränderung der Grundwasserströmungsverhältnisse im Karstgebirge kann ein Verlust der Bettung resultieren.
- ⇨ Neubildung von Hohlräumen durch Verkarstung: Eine Neubildung von Hohlräumen im Karsträgergebirge selbst kann durch die geringe Geschwindigkeit des Verkarstungsprozesses in Karbonaten als Gefährdungsbild ausgeschlossen werden.

DB Neubaustrecke Nürnberg - Ingolstadt
Tunnel Geisberg - Tunnelbau im Karst

DORR
TUNNELBAU

KOMPETENZ IM TUNNELBAU

Absberggasse 47 A-1103 Wien Tel: +43 (0) 50626-0 www.porr.at/tunnelbau

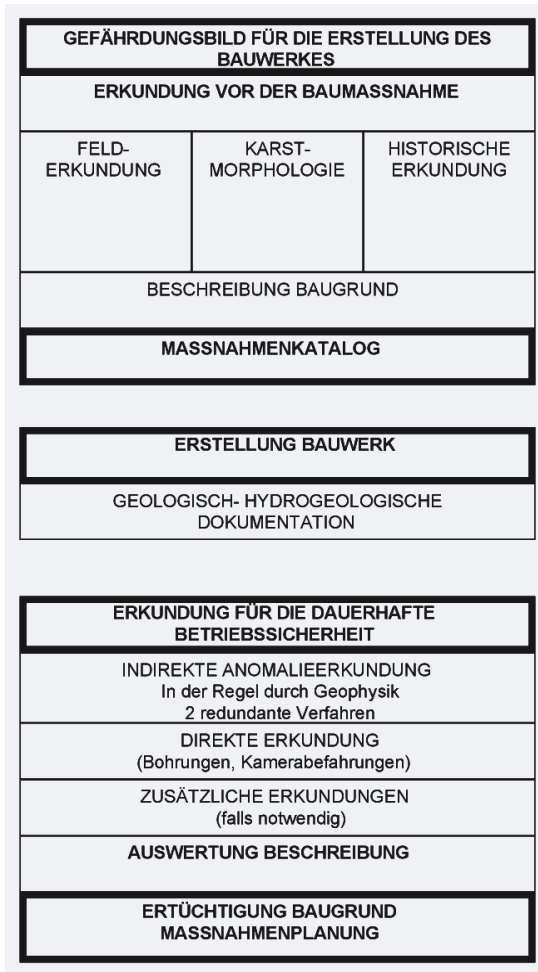


Bild 2 Stufenkonzept zur Erkundung der Karst- und Erdfallgefährdung, nach (6).

Fig. 2 Step-by-step concept for investigating the karst and rockfall hazard, according to (6).

Anforderung an die Baugrunderkundung bei verkarstem Gebirge

Aufgrund der komplexen Karstgenese stellen die Gesteine des Weißen Juras einen sehr heterogenen Baugrund dar. Dieser ist durch das wahllose Auftreten von Verkarstungsstrukturen unterschiedlichster Art und Ausdehnung innerhalb des ansonsten standfesten Gebirges geprägt. Die meisten dieser Verkarstungsstrukturen sind zwar mit tertiären Lockergesteinen plombiert, jedoch existieren daneben auch verstrüzte, mit Blockwerk gefüllte Hohlräume sowie vereinzelt offene Hohlräume. Die Abschätzung dieser Heterogenität erfordert eine stufenweise Abarbeitung der Baugrunderkundung.

Zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit und langfristigen Standsicherheit der Bauwerke der NBS sowie der langfristigen Lagestabilität der Festen Fahrbahn ergeben sich aufgrund der komplexen Untergrundverhältnisse folgende baugrundtechnische Fragestellungen.

Tunnelbauwerke

Bei Tunnelbauwerken ist zwischen Verkarstungsstrukturen, die im, und solchen, die außerhalb des Einflussbereichs des Bauwerks liegen, zu differenzieren. Bei Verkarstungsstrukturen im Einflussbereich sind die Art der Verfüllung (verfüllt, teilverfüllt, offen), deren Größe und Struktur

sowie bei verfüllten Karststrukturen die geometrischen Eigenschaften des Verfüllmaterials und des umgebenden Gebirges von ausschlaggebender Relevanz. Bei Verkarstungsstrukturen außerhalb des Einflussbereichs ist relevant, ob offene Karsthohlräume standsicher sind. Die Auswirkungen von Lage, Größe, Form und Abstand zum Tunnel werden in (7) untersucht.

Erdbauwerke

Bei Erdbauwerken (Einschnitte und Dämme) ist zwischen Erdbauabschnitten, die direkt in den verkarsteten Festgesteinen liegen, und jenen, die in den dem verkarsteten Gebirge auflagernden Lockergesteinen situiert sind, zu differenzieren. Bei Erdbauwerken im verkarsteten Gebirge sind dieselben Randbedingungen wie bei Tunnelbauwerken relevant: Größe und Ausbildung der Verkarstungsstrukturen sowie das Vorhandensein offener Karsthohlräume unterhalb des Bauwerks. Bei Erdbauwerken, die in den dem verkarsteten Gebirge auflagernden Lockergesteinen liegen, sind aufgrund der Tatsache, dass unter tertiärer Lockergesteinsüberdeckung die Karststrukturen vorwiegend plombiert sind, primär die Mächtigkeit der Lockergesteine sowie deren geometrische Eigenschaften für das Baugrundverhalten im Bereich dieser Erdbauwerke relevant. Ein Auftreten offener, nicht standfester Karststrukturen und Materialumlagerungen aus den auflagernden Lockergesteinen in Hohlräume konnte jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Daher war auch für Abschnitte mit einer mächtigen Lockergesteinsüberdeckung eine gesonderte Risikobetrachtung erforderlich.

Stufenkonzept für die Baugrunderkundung

Die komplexe und vielgeschichtete Entwicklung der Fränkischen Alb mit mehreren Erosions-/Verkarstungsphasen und mehreren Phasen der Sedimentation mit unterschiedlichen Sedimenten macht die geologisch-geotechnische Prognose der Karsterscheinungen äußerst schwierig. Die unterschiedlichen Lithologien im Trassenverlauf und die verschiedenen Bauwerke machen die Erkundung und Risikoabschätzung sowie die Maßnahmenplanung nach einem Stufenkonzept erforderlich (6). Jeder einzelne Bauabschnitt wurde hinsichtlich Bau- und Betriebszustand einer detaillierten Betrachtung und Bewertung der entsprechenden Gefährdungsbilder unterzogen (Bild 2).

Erkundungen vor der Baumaßnahme

Die Beurteilung und Klärung dieser aus der Verkarstung des Weißjura-Gebirges resultierenden baugrundtechnischen Fragestellungen war in den verschiedenen Erkundungsphasen (erstes und zweites Erkundungsprogramm sowie Erkundungsstollen NA 4, Tunnel Irlahüll) jeweils eines

der Hauptziele der durchgeführten Erkundungen. In allen Erkundungsphasen wurde in Abhängigkeit von den zu den jeweiligen Zeitpunkten verfügbaren Erkundungsverfahren versucht, das Karstgebirge in seiner Struktur und Ausbildung so genau wie möglich zu erfassen. Wie nachfolgend dargelegt waren diesen Bemühungen vor allem im Hinblick auf kleinräumige, bauwerksrelevante Verkarstungsstrukturen erkundungstechnisch Grenzen gesetzt, die letztendlich dazu führten, dass Untersuchungen auf lokale bauwerksrelevante Verkarstungsstrukturen erst in einer ergänzenden Erkundungskampagne während und nach dem Vortrieb der Tunnelbauwerke beziehungsweise dem Aushub der Einschnitte bis 1 m über Schienenoberkante zielgerichtet durchgeführt werden mussten.

Im Rahmen des ersten und zweiten Erkundungsprogramms wurden zur Erkundung des generellen Aufbaus des Karstgebirges sowie zur Erfassung bauwerksrelevanter Verkarstungsstrukturen Erkundungsmaßnahmen in Form von Kernbohrungen, Luft- und Satellitenbildauswertungen und gerichtetes Bohrlochradar durchgeführt. Als zentraler Bestandteil des Erkundungsprogramms wurde ein Fensterstollen vorab als Erkundungsstollen ausgeführt.

Kernbohrungen

Aufgrund der geotechnischen und hydrogeologischen Ausrichtung des ersten und zweiten Erkundungsprogramms waren die Kernbohrungen sowohl trassennah als auch zur Erfassung der großräumigen hydrogeologischen Verhältnisse trassenfern positioniert. Im trassennahen Bereich betragen die Bohrlochabstände zwischen 150 und 800 m. Im Mittel betragen die Bohrlochabstände etwa 500 m. Anhand dieser punktuellen Aufschlussresultate ergab sich, dass das Gebirge sehr heterogen verkarstet ist und unverkarstete Bereiche unmittelbar in Verkarstungszonen übergehen. Zudem zeigten die Kernbohrungen eine tendenzielle 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. Auf eine weitergehende Untersuchung auf Karststrukturen in den direkten Bauwerksbereichen mittels in engen Rastern angeordneter Bohrungen wurde 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 relevanten Karststrukturen verzichtet.

Luftbildauswertungen

Neben direkten Baugrundaufschlüssen wurden Luft- und Satellitenbildauswertungen zur Ermittlung großräumiger Verkarstungsstrukturen so-

wie tektonischer oder karstbedingter Zerrüttungszonen im Gebirge durchgeführt. Die hierbei ermittelten Oberflächenstrukturen und Lineamente waren aber, wie die Bohrerergebnisse belegten, maßgeblich von der Ausbildung der oberflächennahen Zone sehr starker Verkarstung bestimmt. Anhand der Luftbilduntersuchungen ergaben sich somit zwar hinreichende Aussagen über die flächenhafte Verbreitung dieser Verkarstungszonen, jedoch keine weitergehende Information über Verkarstungsstrukturen in tiefer liegenden Gebirgsbereichen.

Gerichtetes Bohrlochradar

Da die Bohrerergebnisse eine sehr heterogene Verkarstung anzeigten, anhand der Bohrungen sich bauwerksrelevante Karststrukturen jedoch nicht definieren ließen, wurde versucht, diese mittels gerichtetem Bohrlochradar zu erfassen. Bei diesem in der Baugrunderkundung für Tiefgründungen im verkarsteten Gebirge schon erfolgreich eingesetzten Verfahren werden durch die Laufzeitunterschiede der Radarwellen rund um das Bohrloch herum (Erfassungswinkel 360°) verkarstete und unverkarstete Bereiche unterschieden. In Abhängigkeit von den physikalischen Eigenschaften der Gesteine können mit diesem Verfahren unter günstigen Bedingungen Erkundungsreichweiten bis zu 100 m erreicht werden.

B Ü C H E R und mehr ...

Service

Die VGE-Versandbuchhandlung ist ein modernes Kunden-Servicecenter, dessen oberstes Gebot die individuelle Erfüllung spezieller Kundenwünsche ist, so bei Rechnungsaufteilung und -rhythmus, gleich ob bei der Lieferung oder gesammelt zum Monatsende, aufgeteilt nach Kunden-Vorgaben.

Fachbücher, Sachbücher, Lehrbücher, Belletristik, Kinder- und Jugendbücher, Reizelektüre, Loseblattwerke, Zeitungen und Zeitschriften, Neue Medien

■ VGE stellt kostenlos Vorschlags- und Auswahllisten zu vom Kunden gewünschten Themen zusammen. Neben der Literatur-Recherche wird ein Neuerscheinungen-Service geboten.

■ Als Geschenkservice zu besonderen Anlässen übernimmt VGE Verpacken und Versand der Bücher und stellt vorab individuelle Titelvorschlagslisten zusammen. Der Geschenkservice umfasst nicht nur Literatur, sondern Sie wählen gemeinsam mit dem VGE-Repräsentanten exquisite Präsente aller Art aus.

Sie können bei uns in jeder Form bestellen:

Per Brief
Telefon +49 (0) 20 54 / 9 24 - 2 00 bis - 2 04
Fax +49 (0) 20 54 / 9 24 - 2 09
E-Mail buchhandel@vge.de
Internet www.vge.de/buchhandel

VGE
Verlag Glückauf Essen

Verlag Glückauf GmbH · Versandbuchhandlung
Postfach 18 56 19 · 45206 Essen
Montebruchstraße 2 · 45219 Essen

in der VGE-Versandbuchhandlung

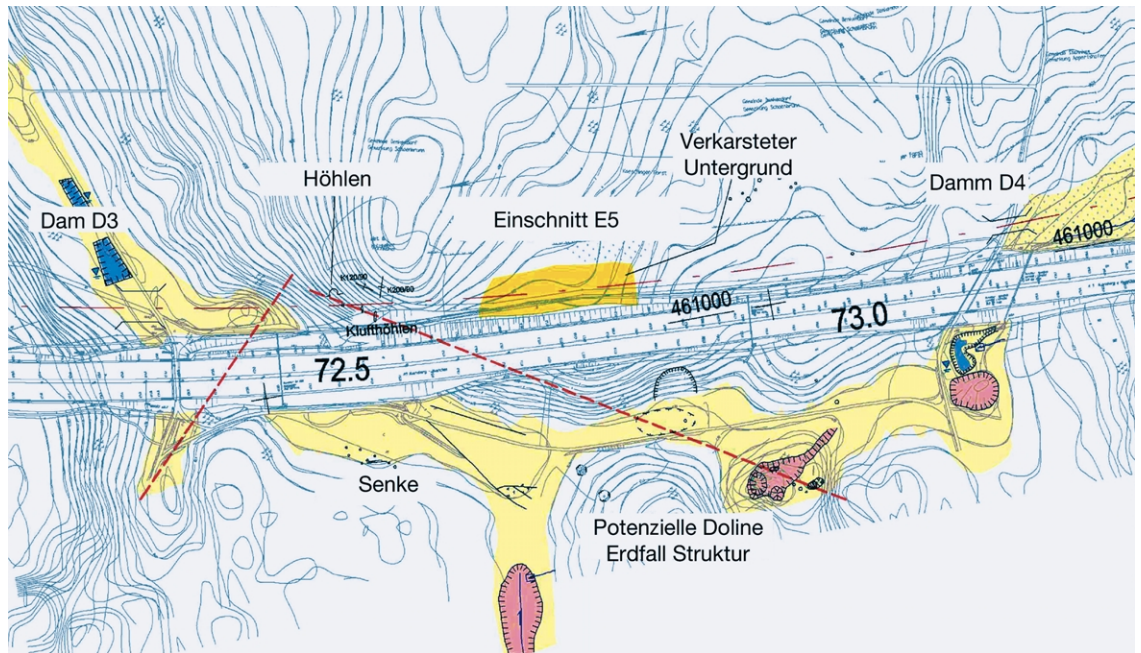


Bild 3 Beispiel der karstmorphologischen Kartierung (Maßstab 1 : 5 000).

Fig. 3 Example of karst morphological mapping.

Unstetigkeitsstellen im Gebirge (zum Beispiel Klüfte) sowie bindiges Material verringern aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Radarwellen die Erkundungsreichweite drastisch. Das heißt liegt ein Karsthohlraum in unmittelbarer Bohrlochnähe, so wird nur dieser erfasst, nicht aber der dahinterliegende Gebirgsbereich.

Die durchgeführten Radarmessungen ergaben zwar für den Nahbereich der Bohrungen gute Aussagen über Größe und Vorkommen von Karststrukturen, die Erkundungsreichweiten waren mit 10 bis 30 m jedoch gering. Zur ganzheitlichen Erfassung von Karststrukturen in den Bauwerksbereichen wäre somit ein Bohrraster von 20 bis 50 m erforderlich gewesen. Aufgrund daraus resultierender Kosten wurde von einem weiteren Einsatz dieses Verfahrens Abstand genommen.

Erkundungsstollen NA 4

Nachdem sich anhand der Baugrunderkundungen mittels Kernbohrungen sowie den zum Zeitpunkt der Erkundungsprogramme zur Verfügung stehenden geophysikalischen Verfahren gezeigt hatte, dass keine hinreichend genauen Aussagen in Bezug auf die Verteilung und das Vorkommen von Karststrukturen möglich waren, wurde zur weitergehenden Erkundung des Karstgebirges der 557 m lange Notausgang NA 4 des Tunnels Irlahüll als Erkundungsstollen aufgefahren. Hierbei sollte das Gebirge im direkten Großaufschluss erkundet werden. Ergänzend sollte die Einsatzmöglichkeit weiterentwickelter geophysikalischer Verfahren (Auswertetechnik) zur Vorauserkundung von Karststrukturen im direkten Vergleich Messung/Aufschluss untersucht werden.

Da der Notausgang NA 4 im Nahbereich einer großen Karstwanne liegt, wurde davon ausgegangen, dass die im Erkundungsstollen angetroffenen Gebirgsverhältnisse als weitgehend repräsentativ anzusehen sind.

Der NA 4 wurde auf den ersten 450 Stollenmetern in sehr stark verkarstetem bis verkarstetem Gebirge mit ständig wechselnden Locker- und Festgesteinsanteilen im Profil aufgefahren. Es wurde jedoch kein offener Hohlraum angetroffen. Anschließend war das Gebirge bis zum Kreuzungspunkt mit dem Haupttunnel vorwiegend unverkarstet.

Einsatz geophysikalischer Messverfahren im NA 4

Für die Vorauserkundung des Gebirges mittels geophysikalischer Methoden wurden sowohl Verfahren im Stollen als auch Verfahren an der Geländeoberfläche eingesetzt. Im Stollen wurde die Reflexionsseismik nach dem VSP (Vertical Seismic Profiling) – Verfahren, mit dem das gesamte Umfeld um den Hohlraum erfasst wird – eingesetzt (4). An der Geländeoberfläche wurden reflexions-/refraktionsseismische Messungen sowie geoelektrische Messungen bei einer Überlagerung von etwa 60 m durchgeführt.

Bei der Refraktions-/Reflexionsseismik werden dynamische Wellen im Boden angeregt (Fallgewicht, Sprengung) und aufgrund der Wellenlaufzeiten der reflektierten oder refraktierten Wellen Schichtgrenzen und Unstetigkeitsstellen im Untergrund ermittelt.

An geoelektrischen Verfahren wurden eine elektromagnetische Kartierung sowie geoelektrische Sondierungen (Dipol/Dipol-Verfahren) durchgeführt. Das erste Verfahren basiert auf der unterschiedlichen Leitfähigkeit der Gesteine und das zweite auf dessen unterschiedlichen Widerständen. Diese werden durch Stromeinspeisung in den Boden gemessen. Über theoretische Rechenansätze werden deren Verteilung im Untergrund und über Eichung der Schichtaufbau ermittelt.

Sämtliche durchgeführten geophysikalischen Verfahren erwiesen sich bei den vorliegenden

geologischen und geotechnischen Randbedingungen als schwer interpretierbar.

Bei der VSP-Seismik ergaben sich bei den im bautechnischen Betrieb möglichen Geophonabständen zu große Unschärfen, sodass die kleinräumigen Karststrukturen sich im Laufzeitdiagramm nicht darstellten. Befriedigende Ergebnisse mit diesem Verfahren sind demzufolge nur bei sehr engen Geophonabständen möglich, wobei sich solche Abstände aber bei laufendem Vortrieb nur schwer realisieren lassen.

Auch die kombinierte Refraktions-/Reflexionsseismik von der Geländeoberfläche aus ergab aufgrund der großen Überlagerung für den maßgebenden Gebirgsbereich im Tunnelniveau nur ein unscharfes Geschwindigkeitsprofil, das keine Interpretation hinsichtlich einzelner Verkarstungsstrukturen zuließ.

Die geoelektrischen Verfahren ergaben aufgrund unzureichender Eindringtiefe in Bezug auf den Stollen kein Ergebnis. Diese spiegelten eine oberflächennahe Verkarstungszone wider und gaben keine Hinweise auf unverkarstete Gebirgsbereiche.

Erkundung während der Baumaßnahme

Historische Erkundung

Die Bewertung bisher vorliegender Erkenntnisse erfolgte in einer Zusammenschau mit einer Recherche von 230 nationalen und internationalen Literaturquellen. Im Hinblick auf die Aufgabenstellung (Hinweise auf bauwerksrelevante Hohlräume) wurden die Unterlagen in zielführende, weiterführende, allgemeine und weitere Literatur unterteilt und flossen in die Risikobewertung mit ein.

Karstmorphologische Kartierung

Zur Ausweisung von Abschnitten mit bevorzugter Infiltration von Oberflächenwasser in den verkarsteten Untergrund wurde eine karstmorphologische Kartierung in einem 500 bis 1 000 m breiten Trassenkorridor ausgeführt (Bild 3). Der Kartierungsbereich erstreckte sich über den gesamten karstgefährdeten Streckenabschnitt vom Altmühltal bis nördlich Ingolstadt.

Ergebnisse der Erkundungen

Die Phasen der Baugrunderkundung – sowohl das erste und zweite Erkundungsprogramm als auch der Vortrieb des Notausgangs – mit der Zielsetzung, die Auswirkung von bauwerksrelevanten Karststrukturen im Einflussbereich des Bauwerks zu erkunden, haben die Schwierigkeit der Karsterkundung gezeigt. Mit den ausgeführten Bohrungen und den zum damaligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden geophysikalischen Verfahren konnte eine qualitative Beschreibung, jedoch keine Quantifizierung der Gefährdung durch Karststrukturen und deren

Auswirkungen auf die langfristige Bauwerksstabilität erfolgen.

Die vorliegenden Erkundungsergebnisse wurden in einer generalisierenden Beschreibung in die ingenieurgeologischen Stellungnahmen aufgenommen. Diese beinhalteten eine Unterteilung des Karstgebirges in Zonen unterschiedlicher Verkarstung, wobei von einer mit der Tiefe abnehmenden Verkarstungsintensität ausgegangen wurde. Für die einzelnen Verkarstungszonen wurden die möglicherweise zu erwartenden Verkarstungsformen und -strukturen dargestellt.

Da jedoch Aussagen zur direkten Lage und Ausbildung von Verkarstungsstrukturen in bauwerksrelevanten Gebirgsbereichen anhand der bei den Erkundungen zur Verfügung stehenden Verfahren nicht möglich war, wurde festgelegt, weitergehende Untersuchungen zu Karststrukturen im Umfeld der jeweiligen Bauwerke erst während der Baudurchführung auszuführen. Entsprechend den zu erwartenden Karststrukturen wurden typische Szenarien für den Tunnelvortrieb entwickelt (8) und ein entsprechender Maßnahmenkatalog erstellt, dessen Anwendung sich bei der Bauausführung bewährt hat.

Ergebnisse der geologischen Dokumentation

Wie die Vortriebe der im verkarsteten Gebirge aufgefahrenen Tunnel Irlahüll, Stammham und Geisberg sowie die bisherigen Aushubarbeiten für die im verkarsteten Gebirge im Bereich des Köschinger Forsts liegenden Festgesteinseinschnitte und die Pfahlbohrungen für diverse Tiefgründungen gezeigt haben, ist das Weißjura-Gebirge, wie in allgemeiner Form prognostiziert, tiefgründig und sehr heterogen verkarstet (Bild 4).

Beim Tunnel Irlahüll wurde im südlichen Abschnitt, in dem das Weißjura-Gebirge von mäch-

Bild 4 Tunnelvortrieb im Karst – Tunnel Irlahüll.

Fig. 4 Tunnel excavation in karst – Irlahüll tunnel.



tigen tertiären Ablagerungen überdeckt ist, eine tiefgründige Verwitterung der Dolomite einhergehend mit einer sehr stark reliefierten Weißjuraoberfläche (Reliefunterschiede bis mehrere Zehnermeter) angetroffen. Dieses Relief, das laterale Erstreckungen von wenigen Metern bis zu 100 m aufweist, ist mit bindigem, tertiärem Lockergestein des Karstdeckgebirges verfüllt. Zwischen den Verwitterungszonen und den Karstschloten sind vorwiegend angewitterte Felsbereiche verblieben, die Ausdehnungen in der Tunnelachse von etwa 10 bis 100 m haben. In den Verwitterungszonen selbst besteht das Gebirge aus einem Gemenge von Felsrelikten in Stein- bis Blockgröße, die allseitig von lehmigem, teilweise auch von sandig/kiesigem Dolomitgrus umgeben sind.

Nördlich dieser von Tertiär überdeckten Tunnelstrecke unterfährt der Tunnel Irlahüll eine Karstwanne ähnlich der, die im Bereich des Notausgangs NA 4 liegt. Im Gegensatz zu den beim NA 4 vorliegenden Gebirgsverhältnissen ist das Gebirge hier durch vielfältige Karststrukturen – verfüllt, teilverfüllt, offen – mit Abmessungen von wenigen Metern bis zu 20 m gekennzeichnet. Nördlich dieser Karstwanne ist das Gebirge bei Überlagerungen von 60 bis 100 m vielfach verkarstet und massig ausgebildet. Allerdings wurden gerade in diesem Gebirgsbereich vereinzelt große offene Hohlräume angetroffen.

In den Tunneln Stammham und Geisberg ist das Gebirge zwar nicht so intensiv verkarstet wie beim Tunnel Irlahüll, jedoch wurden auch hier in massigen Gebirgsbereichen teilweise offene Karsthohlräume angetroffen.

Im Bereich der freien Strecken zeigte sich, dass im Bereich von Tertiärwannen die Oberfläche des Karsträgergebirges sowohl bei massigen als auch bei geschichteten Gesteinen stärker als vermutet reliefiert ist. Dies zeigte sich eindrucksvoll bei der Dokumentation der zur Untergrundverbesserung in den tonigen Tertiärsedimenten im Bereich der Dammbauwerke hergestellten Großschotterssäulen. Zudem zeigte sich bei den in

gebankten Kalksteinen liegenden Felseinschnitten im Köschinger Forst, dass größere unverfüllte Karsthohlräume (zu verzweigten Höhlensystemen mit Öffnungsweiten bis zu 2,0 m erweiterte Kluftkarststrukturen) nicht nur in massigen Dolomiten, sondern vereinzelt auch in bankigen Kalksteinen auftreten können.

Risikobewertung der Karststrukturen aus ingenieur-geologischer Sicht

Aufgrund der in den Tunneln sowie in den freien Streckenabschnitten angetroffenen, durch starke Verkarstung geprägten Gebirgsverhältnisse erfolgte nach der Bauausführung eine vom Bauherrn initiierte und getragene dezidierte Erkundung von bauwerksrelevanten Verkarstungsstrukturen, die gemäß den definierten Gefährdungsbildern die dauerhafte Betriebssicherheit einschränken könnten. Für diese Untergrunderkundung wurde ein Arbeitskreis „Karst“, bestehend aus dem Bauherrn, den Planungsbüros mit Geologen, Geotechnikern, Tunnelplanern und dem Baumanagement gegründet.

Zweck der Risikobewertung war, die erforderliche Nacherkundung auf die speziellen Erfordernisse der einzelnen Abschnitte abzustimmen. Aus geologisch-hydrogeologischer Sicht erfolgte eine Zusammenstellung und Auswertung aller vorhandenen Daten. Auf dieser Grundlage erfolgte eine Einteilung der Strecke in verschiedene Risikozonen. Die Ergebnisse der während des Baus durchgeführten karstmorphologischen Kartierung wurden mit den vorhandenen Erkundungsergebnissen (erstes und zweites Erkundungsprogramm, Luftbilddauswertung, historische Erkundung und geologischen Dokumentation der Bauwerke – Tunnel, Einschnitte, Großschotterssäulen in den Damnstrecken) zusammenfassend ausgewertet und planlich in ingenieur-geologischen Längsschnitten dargestellt.

Zur Beurteilung der Auswirkungen der Entfernung des Hohlraums zum Bauwerk und seiner Größe beziehungsweise Form wurden numerische Modellrechnungen (7) durchgeführt. Die Mächtigkeit des Karstdeckgebirges und seine Ausbildung (Faktor E: Erosionsanfälligkeit – Ausbildung der Deckschichten) wurden zur Risikobeurteilung herangezogen. Weitere Faktoren für die Risikobeurteilung waren die Karstmorphologie (Faktor M: morphologische Karststrukturen im Nahbereich der Trasse) und die Ausbildung des Karsträgergebirges (Faktor V: Verkarstung des Karsträgergebirges).

Ingenieur-geologische Bewertungskriterien

Gemäß den Ergebnissen der Baugrunderkundung und den Erfahrungen aus den Bauarbeiten wurde ein Bewertungsschema (Tabelle 1) entwickelt, das eine Differenzierung von Abschnitten mit unterschiedlichem Gefährdungspotenzial

Tabelle 1 Evaluierung der Gefährdungsfaktoren.

Table 1 Evaluation of hazard factors.

	Faktor	Beschreibung
Faktor E: Erosionsgefahr im Karstdeckgebirge		
E0	0	Kalkverfestigtes Tertiär mit einer Mächtigkeit von über 8 m
E1	1	Steife und undurchlässige Tertiärschichten – Schluffe, Tone, Mächtigkeit über 8 m
E2	3	Erosionsgefährdete Sedimente – Sande, Mächtigkeit unter 8 m
Faktor M: Karstmorphologische Strukturen im Nahbereich der Trasse		
M1	1	Keine Karststrukturen an der Oberfläche
M1a	2	Keine sichtbaren Karststrukturen in landwirtschaftlich dominierten Arealen
M2	3	Einzelne Karststrukturen ohne Bezug zum Bauwerk
M3	5	Karststrukturen unmittelbar im Bauwerksbereich
Faktor V: Verkarstungsintensität des Karsträgergebirges		
V0	0	Keine karstanfälligen Gesteine oder Mergeleinlagerungen
V1	1	Geschichtete Karbonate mit geringer Zerlegung
V2	2	Massige oder bankige Karbonate mit starker Karstanfälligkeit

Ingenieurgeologischer Längsschnitt Beschreibung der Geologie und der verschiedenen Bauwerke

Ergebnisse der Lineamentausrwertung und der karstmorphologischen Kartierung - Ausbildung des Karstdeckgebirges mit Schichtmächtigkeiten

Gesamtmächtigkeit des Karstdeckgebirges
Faktor E: Erodierbarkeit d. Karstdeckgebirges
Faktor M: Morphologische Karststrukturen
Faktor V: Verkarstung im Karsträgergebirge
Klassifikation für Kollapserefälle
Klassifikation für Suffosionserefälle

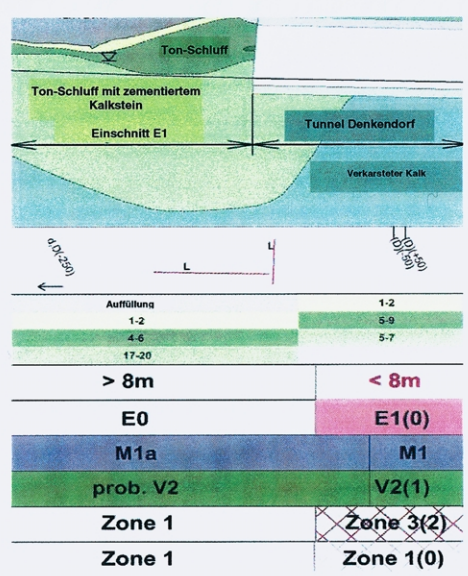


Bild 5 Beispiel für die Risikobeurteilung.

Fig. 5 Example of risk assessment.

aufzeigt (Bild 5). Aus der Bewertung und unterschiedlichen Gewichtung der einzelnen Gefährdungsfaktoren E, M und V wurden Zonen mit unterschiedlichem Risikopotenzial von Zone 0 – ohne Gefährdungspotenzial und ergänzendem Erkundungsbedarf – bis Zone 3 – mit hoher Karstgefährdung und Bedarf einer detaillierten Nacherkundung mit unterschiedlichen Erkundungsmethoden – ausgewiesen.

Ergebnisse

- ⇨ Aufgrund der unterschiedlichen Ausbildung der Karstentwicklung ergibt sich eine sehr unterschiedliche Gefährdung für die einzelnen Streckenabschnitte.
- ⇨ Es wurden sämtliche Streckenabschnitte als nicht karstgefährdet beurteilt, in denen Gesteine der mergelsteinreichen und mergelsteinarmen Fazies des Oxford und Kimmeridge anstehen. Auf Basis dieser Risikobeurteilung konnten der Südabschnitt des Tunnels Euerwang, der Tunnel Schellenberg sowie der Nordabschnitt des Tunnels Irlahüll samt Notausgang NA 1 von der weiteren Erkundung ausgenommen werden.
- ⇨ In den Einschnitten im Köschinger Forst, in denen die Bauwerke in tertiären Gesteinen (Schluffen, Tonen zum Teil mit Kalk verfestigt) gegründet werden und in denen schwebende Aquifere eine weitgehende Undurchlässigkeit der Deckschichten anzeigen, konnte von einer mäßigen Karstgefährdung ausgegangen werden.
- ⇨ Südlich des Tunnels Geisberg bei Etting taucht der Weißjura vollständig unter die Molasse ab, was gespannte Verhältnisse im Karstaquifer bewirkt. Bedingt durch die hier anstehenden tertiären Gesteine mit Mächtigkeiten von über 8 m konnte auch in diesem Abschnitt von einer mäßigen Karstgefährdung ausgegangen werden.
- ⇨ Das höchste Gefährdungspotenzial wurde, wie auch die Dokumentation der aufgefahrenden Tunnelbauwerke belegt, in Bauwerksabschnitten, die in massigen Gesteinen liegen, identifiziert.

Streckenabschnitte in gebankten Kalksteinen weisen aufgrund der angetroffenen Hohlräume eine deutlich geringere Karstgefährdung auf.

Auf der Grundlage dieser Risikobeurteilung ergab sich, dass im gesamten Streckenabschnitt vom Tunnel Irlahüll (ausgenommen der Tunnelstrecke in mergelsteinreichen Gesteinen des Kimmeridge) bis südlich des Tunnels Geisberg eine weitergehende Detailerkundung der Karststrukturen erforderlich ist. Art und Umfang der dabei in den einzelnen Streckenabschnitten durchgeführten Erkundungsmaßnahmen sowie deren Ergebnisse sind im Beitrag zum geophysikalischen Untersuchungskonzept (9) dargestellt.

Quellennachweis

1. Meyer, R.K.F. ; Schmidt-Kaler, H.: *Wanderungen in die Erdgeschichte. Durchs Urdonautal nach Eichstätt*. München: Verlag Friedrich Pfeil, 1991.
2. Apel, R.: *Hydrogeologische Untersuchungen im Malmkarst der Südlichen und Mittleren Frankenalb*. In: *Geologica Bavarica* 64 (1971), S. 268-355.
3. Glaser, S.: *Die Verkarstungsgeschichte des Malms der Südlichen Frankenalb*. In: *Laichinger Höhlenfreund* 35 (2000), Nr. 1.
4. Brückl, E. ; Chwatal, W. ; Dölzlmüller, J. ; Jöbstl, W.: *An Analysis of the Application of VSP to the Exploration Ahead of a Tunnel*.
5. Bayrisches geologisches Landesamt: *Geologische Karte von Bayern, 1 : 500 000*. München 1996.
6. Pöttler, R. ; Schneider, V. ; Rehfeld, E. ; Quick, H.: *Grundkonzept zur Lösung der Karst- und Erdfallproblematik für den Bau von Verkehrswegen*. In: *Felsbau* 20 (2002), Nr. 3, S. 10-21.
7. Mattle, B. ; John, M. ; Spiegl, A.: *Numerische Untersuchungen für den Tunnelbau im verkarsteten Gebirge*. In: *Felsbau* 21 (2003), Nr. 1, S. 29-34.
8. John, M. ; Strappeler, G.: *Maßnahmen für den Tunnelvortrieb im verkarsteten Gebirge der NBS Nürnberg-Ingolstadt*. In: *Felsbau* 21 (2003), Nr. 1, S. 22-27.
9. Radinger, A. et al.: *Die Geophysik im Einsatz zur Karst- und Erdfallerkundung im Zuge von Hochleistungsstrecken*. In: *Felsbau* 21 (2003), Nr. 1, S. 42-49.

Autoren

Dr. Klaus-Dieter Höwing (E-Mail klaus-dieter.hoewing@dhb-geo.de), DHB Beraten & Planen, Oberdorfstraße 12, D-91747 Westheim, Deutschland, Mag. Stefan Eder (E-Mail stefan.eder@ibk.ilf.com) und Dipl.-Geol. Marcus Plank, ILF – Beratende Ingenieure ZT GmbH, Framsweg 16, A-6020 Innsbruck, Österreich