

# Praxisorientierte Behandlung von Karstproblemen am Beispiel der Felseinschnitte im Baulos Süd der ICE-Neubaustrecke Nürnberg – Ingolstadt

DR. RALF J. PLINNINGER, THOMAS AMADORI & WOLFGANG ECKSTALLER

Dipl.-Ing. Bernd Gebauer Ingenieur GmbH, München

## ZUSAMMENFASSUNG

Die in Bau befindliche ICE-Neubaustrecke von Nürnberg nach Ingolstadt durchquert in ihrem Südabschnitt zwischen Ingolstadt und dem Altmühlthal Malmkalk-Abfolgen der Fränkischen Alb. Die dieses Gebirge prägenden, sehr wechselhaft ausgebildeten Verkarstungerscheinungen sowie deren Auswirkungen auf die dauerhafte Gebrauchstauglichkeit des fertig gestellten Fahrweges der ICE-Strecke beeinflussen dabei die bautechnische Ausführung der Streckenbauwerke in vielfältiger und erheblicher Weise. Der Beitrag beschäftigt sich am Beispiel der in Bauausführung befindlichen Felseinschnitte des Bauloses Süd mit den karstbezogenen Fragestellungen und den hier angewendeten praxisorientierten Lösungsansätzen.

## 1 EINFÜHRUNG

Die 89 km lange Neubaustrecke Nürnberg–Ingolstadt bildet gemeinsam mit der Ausbaustrecke Ingolstadt–München einen wesentlichen Bestandteil des transeuropäischen Hochgeschwindigkeits-Bahnnetzes. Bei einer maximalen Reisegeschwindigkeit von 300 km/h werden die ICE-Reisezeiten zwischen den bayerischen Metropolen Nürnberg und München von jetzt 102 Minuten auf rund 60 Minuten verkürzt werden. Die Aufnahme des Regelbetriebes ist für Dezember 2006 geplant.

Im rund 16,5 km langen Teilbaulos Süd überwindet die Strecke den Abstieg aus der Hochebene der Fränkischen Alb in die so genannten „Ingolstädter Senke“, die von quartären und tertiären Lockergesteinen aufgebaut wird (Abb. 1).

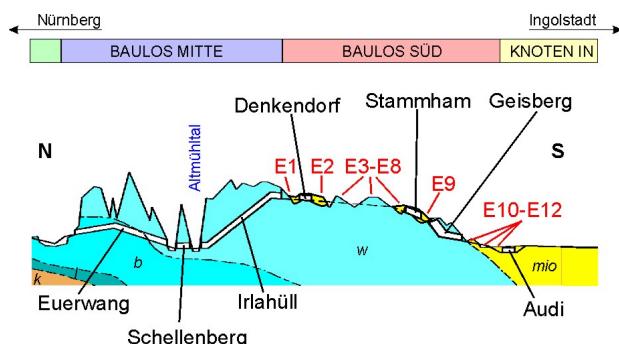


Abb. 1: Schematischer geologischer Längsschnitt durch den Südabschnitt der NBS Nürnberg-Ingolstadt.

Legende: mio-Tertiär/Miozän; w-Jura/Malm; b-Jura/Dogger; l-Jura/Lias; k-Trias/oberer Keuper

Bestandteil des Bauloses Süd sind neben insgesamt vier Tunnelbauwerken in bergmännischer Bauweise (Tunnel Geisberg, 3289 m; Tunnel Stammham, 1320 m), offener Bauweise (Tunnel Denkendorf, 1925 m) bzw. Deckelbauweise (Verlängerung Tunnel Denkendorf, 1265 m) vor allem zwölf in Locker- und Festgestein zu erstellende Einschnitte mit einer Gesamtlänge von 7,1 km.

Die hier angetroffenen geologischen Verhältnisse sind überaus komplex. Nach Ablagerung im mittleren und oberen Malm (Weißjura) wurden die den Landschaftscharakter der Fränkischen Alb prägenden Kalk- und Dolomitgesteine sehr wechselhaften Verwitterungs- und Verkarstungsprozessen ausgesetzt, die in der Oberkreide vor rund 100 Mio. Jahren begannen.

Als „Karst“ werden Phänomene bezeichnet, bei denen verkarstungsfähige Gesteine (Karbonate, Sulfate) durch im Untergrund oder an der Erdoberfläche strömende Wässer gelöst werden. Die Verwitterungs- und Verkarstungsvorgänge gingen dabei meist Hand in Hand mit der Wiederaufbildung von Kalk (Tropfstein- und Sinterbildung) sowie Senkungs- und Einsturzvorgängen oder der Verfüllung von Hohlräumen mit terrestrischen Sedimenten.

Im Tertiär wurden in Teilbereichen lithologisch sehr wechselhaft ausgebildete limnisch-fluviatile

Sedimente auf den verkarsteten Malmgesteinen abgelagert. Die geologische Gesamtsituation lässt sich in diesen Gebieten mit dem Bild einer in tertiären Sedimenten „ertrunkenen“ Kegelkarstlandschaft beschreiben, die mit komplexer Morphologie und kleinräumig variierenden geotechnischen Verhältnissen aufzuwarten weiß (Abb. 2).

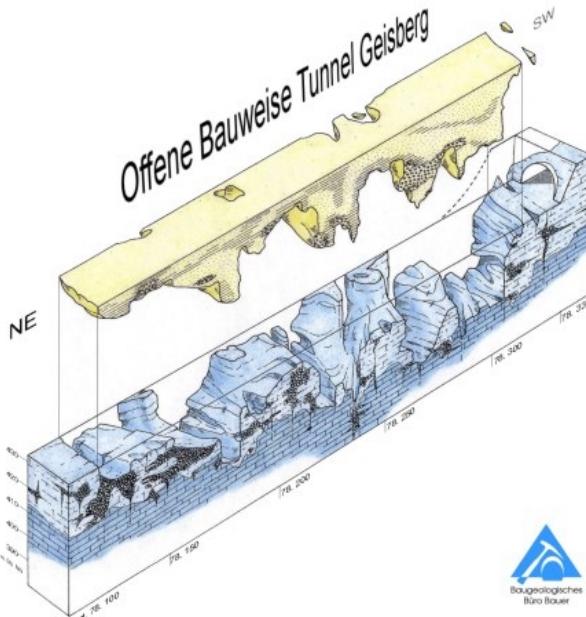


Abb. 2: Blockbild der geologischen Verhältnisse im Bereich der offenen Bauweise Tunnel Geisberg [2].

## 2 KARSTPHÄNOMENE IM BAULOS SÜD: EIN ÜBERBLICK

Die im Baulos Süd anstehenden Weißjura-Gesteine sind zeitlich dem oberen Kimmeridge und Tithon zuzurechnen. Es handelt sich um massige Dolomite, die Riff-Komplexe bildeten sowie bankige Kalksteinfolgen, die in Flachwasserbereichen zwischen den Riffen abgelagert wurden. Die Bankkalkfazies ist dabei in den Felseinschnitten des Bauloses Süd anteilmäßig weit überwiegend.

Im Gegensatz zu den Gesteinen der Riff-Fazies, die nur andeutungsweise und unregelmäßig von Trennflächen durchzogen sind, ist in den Bankkalke ein relativ homogen ausgebildetes Trennflächengefüge mit mittelbankigen Schichtabständen und einem vorwiegend zweiseitigen, orthogonalen Kluftsystem (Hauptstreichrichtungen NNE-SSW und WNW-SSE) mit variierenden Kluftabständen zu beobachten.

Diese generellen lithologischen Charakteristika sind auch für Umfang und Ausbildung der angetroffenen Karststrukturen von Bedeutung, da die Verkarstungsprozesse vorrangig von tektonisch vorgezeichneten Zonen besserer Wasserwegsamkeit (Klüfte, Störungen) aus in das Gebirge eingreifen. In den regelmäßig durchtrennten bankigen

Kalken findet dabei vorwiegend eine Erweiterung von Klüften statt, die bis hin zur Entwicklung lang gestreckter meterbreiter Spalten (Abb. 3) und mehrere zehner Meter messender Einsturzstrukturen führen kann. In den massigen, dolomitischen Gesteinen sind die Karststrukturen dagegen unregelmäßig-schlauchförmig, sehr variabel in ihrer Größe und unsystematisch verteilt (Abb. 4).

Höhenlage, Ausdehnung und Aktivität der Karstvorgänge sind in erheblichem Umfang auch von den hydrogeologischen Verhältnissen und deren Entwicklung abhängig: Das heutige Niveau des in den Malmkalken anstehenden Karstwasserspiegels liegt in Tiefen von rund 50-70 m unter den Einschnittsohren. Die im Sohniveau der Einschnitte angetroffenen, umfangreichen Phänomene können also vorwiegend als heute inaktive Ergebnisse eines früheren, vermutlich tertiärzeitlichen Grundwasserschwankungsbereichs interpretiert werden.



Abb. 3: Typische Ausbildung der Felsoberfläche im Bereich gebankter Malmkalke. Die Verkarstung folgt dem regelmäßigen Kluftsystem. Bildbreite ca. 6m.



Abb. 4: Typische Ausbildung der Felsoberfläche im Bereich massiger, dolomitischer Kalke. Die unregelmäßig brechenden Dolomitsteine sind z. T. metertief von unregelmäßig-schlauchförmigen Karstspalten und Hohlräumen durchzogen. Bildbreite ca. 6 m.

### Regelquerschnitt Fahrbahnaufbau Felseinschnitte

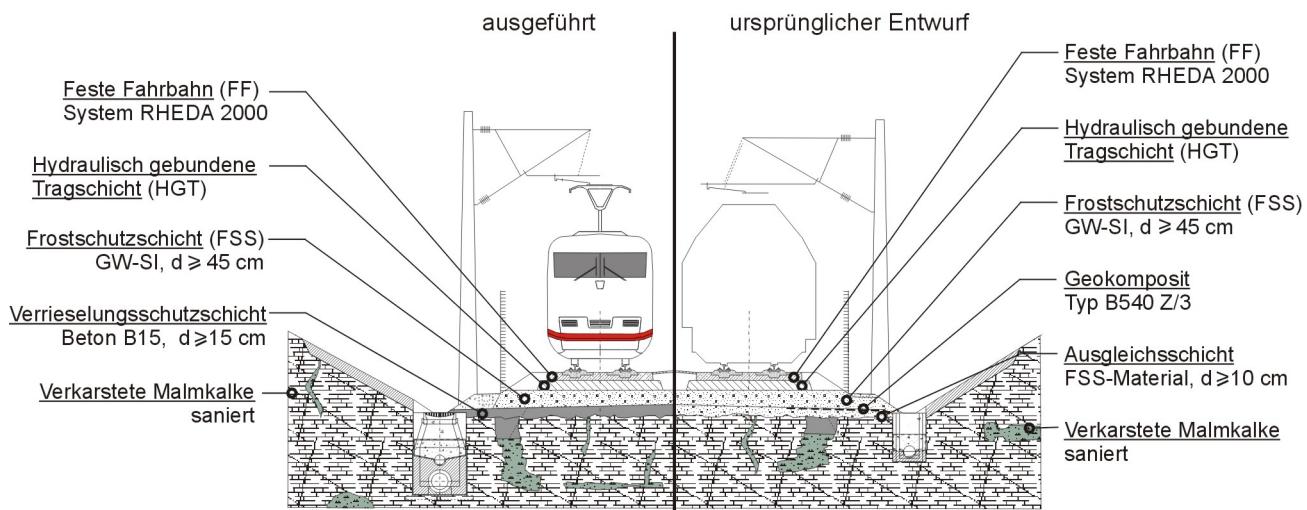


Abb. 5: Aufbau des Fahrbahnunterbaus im Bereich verkarstungsfähiger Felseinschnitte.

### Strukturtypen - Klassifizierung nach Größe und Füllung

<b>tektonische Kluft</b> geschlossen	<b>karsterweiterte Kluft</b> Breite -10 cm	<b>Karstpalte</b> Breite 10-100 cm	<b>Karsthohlraum</b> Erstreckung > 1,0 m	<b>Doline</b> (Einbruchkessel) Erstreckung im m- bis 10er m-Bereich
vollständig verfüllt	offen/unvollständig verfüllt	vollständig verfüllt	vollständig verfüllt	vollständig verfüllt
		offen/unvollständig verfüllt	offen/unvollständig verfüllt	offen/unvollständig verfüllt

### Gefährdungsszenarien

unproblematisch	<b>Abrieseln</b> von Material aus Unterbau	<b>Steifigkeitsdifferenzen</b> zwischen Fels und Lockergestein	<b>Abrieseln</b> von Material aus Unterbau	<b>Steifigkeitsdifferenzen</b> zwischen Fels und Lockergestein	<b>plötzlicher Kollaps</b> eines Hohlräums unter der Sohle	<b>Steifigkeitsdifferenzen</b> zwischen Fels und Lockergestein	<b>plötzlicher Kollaps</b> eines Hohlräums unter der Sohle
-----------------	---	---	---	---	---	---	---

Abb. 6: Karstbezogene Strukturtypen und daraus resultierende Gefährdungen für die Streckenbauwerke.

### 3 GEFÄHRDUNGEN DER STRECKE DURCH KARST

Der im verkarstungsfähigen Untergrund ausgeführte Regelaufbau des Fahrbahnunterbaus ist in Abb. 5 dargestellt.

Für die Karstproblematik sind dabei neben dem Ausschluss von Erdfällen insbesondere die technischen Rahmenvorgaben von maximal 15 mm Restsetzung innerhalb des Nutzungszeitraumes und ein maximal zulässiger Ausrundungsradius des Gleises von  $r = 0,4 * v^2$  von Bedeutung.

Entsprechend dem in Abb. 6 dargestellten Schema werden in Anlehnung an [1] fünf beschreibende Strukturtypen unterschieden. Aus diesen Karstphänomenen ergeben sich zahlreiche potenzielle Probleme, die im Rahmen von Sicherheits- und Parameterstudien untersucht worden sind. Die vor allem im Sohlbereich der Strecke sicher zu beherrschenden bzw. auszuschließenden Risiken sind wie folgt zu konkretisieren (Abs. 3.1-3.5):

#### 3.1 Plötzlicher Kollaps offener untertägiger Strukturen

Bei diesem „worst case“-Szenario wird die Trasse durch plötzliches Versagen von im Untergrund vorhandenen, unverfüllten oder teilverfüllten Karststrukturen gefährdet. Derartige Erdfallereignisse an der Geländeoberfläche haben entsprechend schwerwiegende Konsequenzen für die Lagestabilität und Gebrauchstauglichkeit des Fahrweges.

#### 3.2 Einsenkungen über offenen untertägigen Strukturen

Bei diesem Gefährdungsbild treten an der Geländeoberfläche Einsenkungen durch Materialabtransport in tiefer gelegene, unverfüllte Hohlräume auf. Dieser Vorgang kann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die von den jeweiligen Randbedingungen wie z. B. Wassereintrag abhängen, vonstatten gehen. Die hierdurch entstehenden Oberflächenformen können von weitläufigen Senkungsmulden bis relativ scharf abgegrenzten Einbruchstrukturen reichen, die wiederum negative Auswirkungen auf die Lagestabilität der Festen Fahrbahn haben können.

#### 3.3 Lang anhaltende Setzungen über bindigen Karstfüllungen

Neben unverfüllten Karststrukturen sind im Untergrund überwiegend mit bindigen Quartär-/ Tertiärsedimenten verfüllte Klüfte und Spalten unterschiedlicher Abmessungen vorhanden. Hierbei treten vorwiegend weitgestufte, meist bindige

Lockergesteine ( $T,u^*-T,u^*,g,x$ ) als Füllmaterial auf. Je nach Lage, Ausdehnung und Mächtigkeit dieser gefüllten Karststrukturen besteht die Gefahr von lang anhaltenden, für die Feste Fahrbahn unverträglichen Setzungen über diesem Material.

#### 3.4 Problematische Steifigkeitsdifferenzen bei lokal rasch wechselnden Gebirgseigenschaften

Infolge der dynamischen Kompression, denen Fahrbahn, Unterbau und Untergrund während des Hochgeschwindigkeitsverkehrs ausgesetzt sind auftretende Steifigkeitssprünge im Baugrund als problematisch für die Langzeitintegrität des Streckenbauwerks einzustufen. Dies kann z. B. bei kleineräumigem Wechsel von Fest- zu Lockergestein auftreten, wie es bei größeren oberflächennahen bindig verfüllten Karststrukturen im anstehenden Karbonatgestein der Fall ist.

#### 3.5 Abrieseln von Material aus dem Gleisunterbau in offene Klüfte und Spalten

Dieses Gefährdungsbild gilt für Streckenabschnitte, in denen der Unterbau der Festen Fahrbahn auf anstehendem, verkarstungsfähigem Kalkstein aufgebaut wird. Hier besteht die Gefahr, dass im Rahmen des Schienenbetriebs Frostschutzmaterial aus der Frostschutzschicht (Abb. 5) in unverfüllte, oberflächennahe Klüfte, Spalten und Hohlräume abrieselt. Aufgrund des so entstehenden Massendefizites unterhalb der Festen Fahrbahn können für den Fahrweg Setzungen in unverträglichen Größenordnungen eintreten.

### 4 KARSTERKUNDUNG

Ziel aller Erkundungs- und Sanierungsmaßnahmen ist die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit der fertig gestellten ICE-Strecke für einen Nutzungszeitraum von mindestens 100 Jahren. Die Baugrunderkundung folgt einem mehrstufigen Erkundungsprogramm [2], [5], [6]. Die Hand in Hand mit der Bauausführung zur Erkundung relevanter Karststrukturen eingesetzten Methoden umfassen eine umfangreiche Kombination indirekter und direkter geotechnischer Verfahren, die nachstehend kurz charakterisiert werden.

#### 4.1 Geophysikalische Methoden

Vorrangige Aufgabenstellung der kombinierten geophysikalischen Untersuchung ist die Erkennung großräumiger Problemzonen und oberflächennaher Hohlräume. Hierzu wurden im Bereich der Freien Strecke der NBS Nürnberg-Ingolstadt seismische und gravimetrische sowie Georadarverfahren unter Einbeziehung von Kernbohrungen in Verdachtsbe-

reichen durchgeführt. Auf eine detaillierte Darstellung der eingesetzten Verfahren und Methoden kann mit Hinweis auf die ausführlicheren Berichte in [4], [8] verzichtet werden.

Im Bereich der Festgesteinseinschnitte kamen vorrangig die Verfahren der Reflexions- und Refraktionsseismik sowie Gonoradar zum Einsatz. Bei genereller Verwendung zweier verschiedener Verfahren konnten folgende Erkundungsziele erreicht werden (Abb.7):

- Detektion von offenen Hohlräumen  $\geq 1,5$  m in einem Bereich bis 2,0 m unter Untersuchungsebene,
- Detektion von offenen Hohlräumen  $\geq 2,5$  m in einem Bereich bis 6,0 m unter Untersuchungsebene,
- Detektion von offenen Hohlräumen  $\geq 5,0$  m in einem Bereich bis 10,0 m unter Untersuchungsebene.

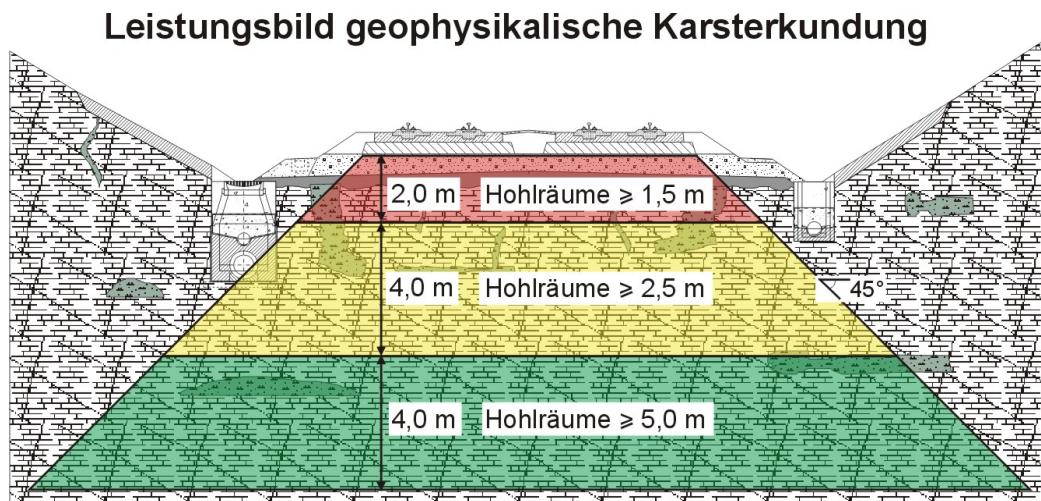


Abb. 7: Schematische Darstellung des Leistungsbildes der geophysikalischen Hohlraumerkundung (nach AK Karst / Ingenieurgesellschaft Lässer & Feizlmeyer).

### Reflexionsseismik

Bei der Reflexionsseismik wird das Ausbreitungsverhalten von reflektierten seismischen Wellen untersucht und interpretiert. Die z. B. durch einen schweren Schlagapparat generierte Welle wird an im Untergrund vorhandenen Strukturen wie Schichtgrenzen oder Hohlräumen reflektiert oder gestreut. Der reflektierte Anteil wird von seismischen Aufnehmern (so genannten „Geophonen“, Abb. 8) registriert. Durch die Auswertung der so erhaltenen Daten über die reflektierten Energienmengen können Schlüsse über den Untergrundaufbau gezogen werden.

### Refraktionsseismik

Bei der Refraktionsseismik wird das Phänomen ausgenutzt, dass seismische Wellen an geologischen Grenzflächen wie Schichtgrenzen oder Hohlräumen gebrochen werden. Da die jeweiligen Wellengeschwindigkeiten materialabhängig sind, erfolgt z. B. bei Zunahme der seismischen Geschwindigkeit in einer unteren Schicht gegenüber der seismischen Geschwindigkeit in einer überlagernden Schicht eine Brechung der Welle vom Lot. An der Grenzschicht dieses Übergangsbereiches wird ein Anteil der eingebrachten Energie unter dem Winkel der Totalreflexion abgestrahlt, der in einer von den jeweiligen Wellengeschwindigkeiten

abhängigen Entfernung vom Anregungspunkt an der Oberfläche gemessen werden kann.



Abb. 8: Ausgelegte Geophonkette für seismische Karsterkundung.

Aus den ermittelten Wellengeschwindigkeiten können Informationen über die jeweiligen Gebirgsparameter abgeleitet werden.

## Gravimetrie

Bei gravimetrischen Messungen wird das lokale Schwerefeld der Erde gemessen. Dieses wird u. a. von geologischen Einflussgrößen wie der Dichte der im Untergrund anstehenden Gesteine beeinflusst. Im Untergrund vorhandene Massendefizite wie Hohlräume und Tonfüllungen können bei dieser Methode anhand von Abweichungen im Schwerefeld ermittelt werden.

## Georadar

Bei der geophysikalischen Erkundung mit Georadar werden während des Messvorgangs über spezielle Antennen, die entlang der zu untersuchenden Profile bewegt werden, elektromagnetische Wellen in Form hochfrequenter Impulse in den Baugrund abgestrahlt. Im Untergrund werden diese in Abhängigkeit der Materialeigenschaften und des geologischen Aufbaus reflektiert oder gestreut. Die zur Empfangsantenne zurücklaufenden Wellen werden vorverstärkt, frequenztransformiert und dann zur Empfangseinheit weitergeleitet. Hier erfolgt eine Filterung sowie eine weitere Verstärkung der empfangenen Wellenfelder.

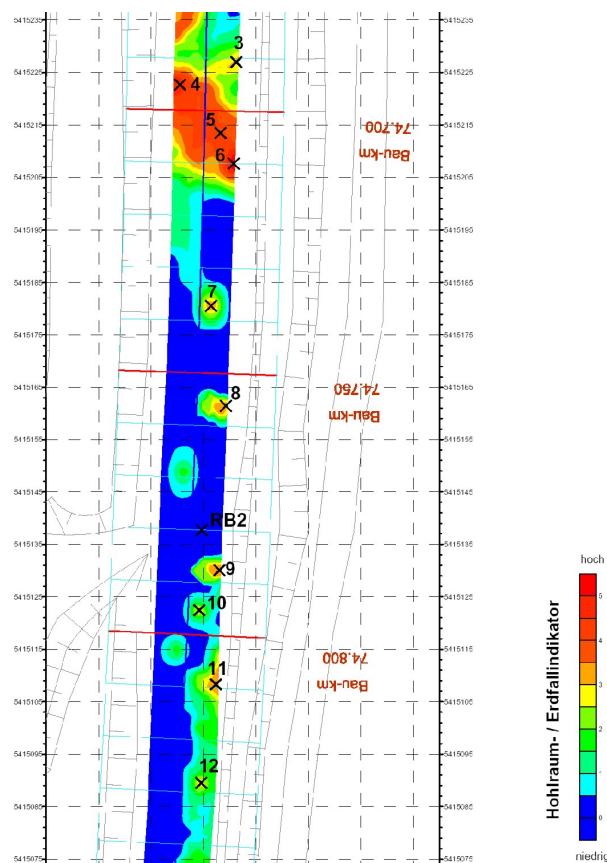


Abb. 9: Zusammenfassende Interpretation der geophysikalischen Erkundung im Sohlniveau.

Registriert und gespeichert werden die Amplituden und die Laufzeiten der Signale innerhalb von Zeitfenstern, deren Längen in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung zu wählen sind.

Die von Objekten oder Strukturen reflektierten Wellenfelder werden in so genannten „Radarogrammen“ aufgezeichnet. Die Aufzeichnung von Anomalien setzt voraus, dass der elektromagnetische Impedanzkontrast gesuchter Strukturen oder Objekte groß genug für eine Detektion ist. Bei dem Einsatz von Georadar ist zu beachten, dass die Erkundungstiefe dieses Verfahrens durch elektrisch leitfähige Materialien wie z. B. feuchten Ton oder einen Grundwasseraquifer eingeschränkt bzw. begrenzt wird.

## 4.2 Bohraufschlüsse und Kamerabefahrungen in Bohrungen

In Bereichen, in denen aufgrund der geophysikalischen Erkundung ein Verdacht auf offene Hohlräume in relevanter Ausdehnung und Tiefenlage bestand (siehe auch Abb. 9), wurden Rotationskernbohrungen (überwiegend  $\varnothing$  146 mm) abgeteuft. Als zusätzliche Interpretationshilfe der Bohrergebnisse dienten die während der Bohrarbeiten dokumentierten Bohrparameter wie Bohranpressdruck, Bohrfortschritt und Spülverlust. Anhand der erhaltenen Bohrkerne und Bohrparameter war eine detailliertere Interpretation der im Untergrund vorhanden Baugrundverhältnisse möglich. Eventuell widersprüchliche Ergebnisse (z. B. Kernverluste oder geringer Kerngewinn bei dennoch langsamem Bohrfortschritt) wurden durch Kamerabefahrungen der Bohrlöcher überprüft. Mit dieser Vorgehensweise war es insbesondere auch möglich, das randliche Erbohren eines Hohlraumes ( $\Rightarrow$  geringer Kerngewinn, langsamer Bohrfortschritt) auszuschließen.

## 4.3 Baubegleitende ingenieurgeologische Detailkartierung

Die letzte Stufe der Karsterkundung stellte die baubegleitend durchgeführte ingenieurgeologische Detailkartierung dar. Sie diente der Identifizierung und Quantifizierung oberflächennaher Verkarstungsstrukturen und der Beurteilung der generellen lithologischen, tektonischen sowie Verwitterungs- und Verkarstungssituation. Anhand der hierbei gewonnenen Ergebnisse konnte zudem die vorangegangene geophysikalischen Erkundung überprüft und gegebenenfalls reinterpretiert werden.

Die Detaildokumentation basiert im besonders sensiblen Bereich der Einschnittsohle auf einer gemeinsam von Geologen des Bauüberwachungs-

zentrums (BÜZ) Süd und der ARGE Streckenbau angefertigten Kartierung im Maßstab 1:100. Zusammen mit den im Maßstab 1:200 aufgenommenen Einschnittsböschungen und den Ergebnissen der vorangegangenen Erkundung wurden die Da-

ten in einem Grundrissplan 1:200 mit heruntergeklappten Böschungen dargestellt. Diese geologisch-geotechnische Dokumentation stellt die Grundlage für die Planung und Ausführung der Sanierungsmaßnahmen dar (Abb. 10).

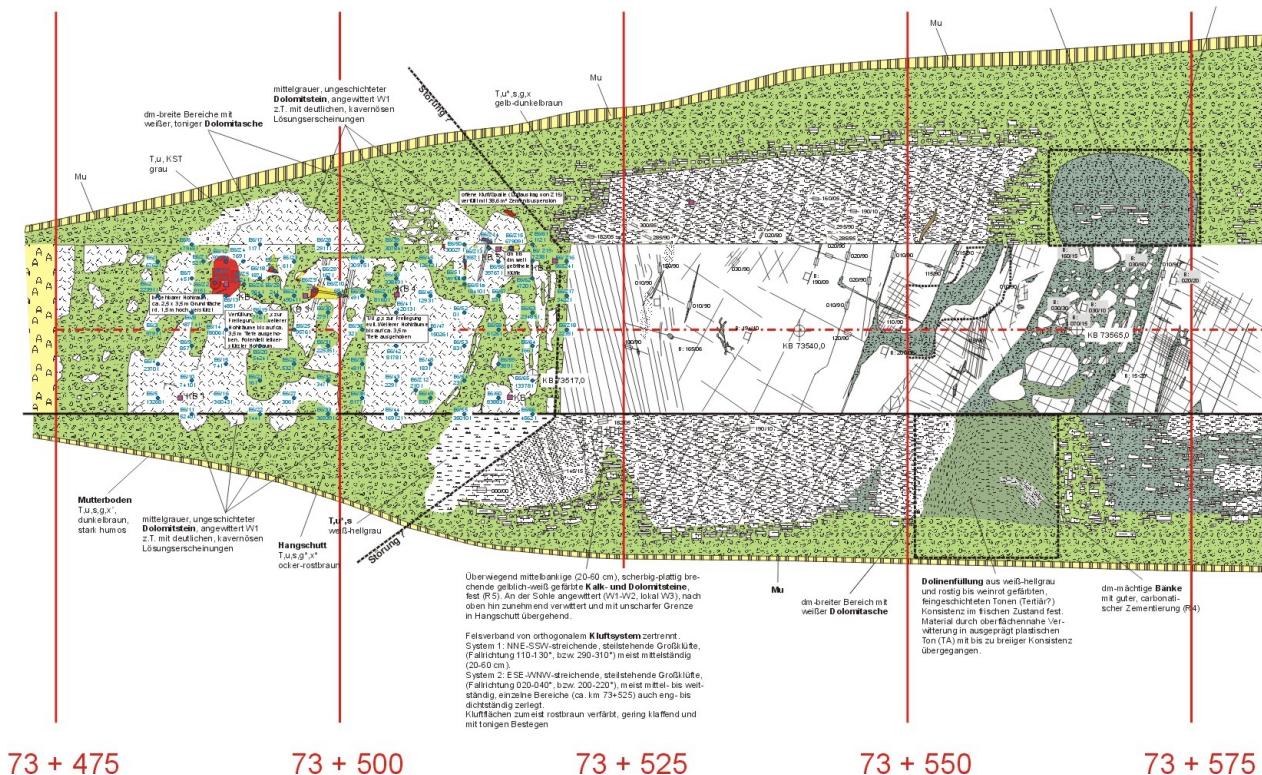


Abb. 10: Beispiel für die geologisch-geotechnische Detaildokumentation 1:200 der Einschnitte (BÜZ Süd). Dargestellt sind neben der im Maßstab 1:100 kartierten Einschnittsohle die abgeklappten Böschungen.

Die Kartierung erfolgte nach Abschluss der Aushubarbeiten, die zunächst mit Mobil- und Kettenbaggern bis auf das Niveau der Unterkante der Frostschutzschicht (UK FSS) geführt wurden. Danach wurde die auf diesem Niveau anstehende Felsfläche ohne schweres Gerät, z. B. mit Minibaggern, händisch sowie durch abschließendes Abkehren und/oder Abblasen in besenreinem Zustand freigelegt (Abb. 11).

Die ingenieurgeologische Aufnahme der beräumten Sohlfläche erfolgte nach den Erfordernissen des Bauablaufs ganz- oder halbseitig in 25 m- bis 50 m-Blöcken. Für die lagetreue Darstellung des geologischen Inventars diente ein auf die Sohle aufgesprühtes Koordinatennetz mit einem Gitterpunktstand von 2 m. Neben der Aufnahme des Trennflächengefüges sowie lithologischer und karstbezogener Charakteristika lag ein besonderes Augenmerk auf der Identifizierung von Hinweisen auf tiefer liegende, potenziell unverfüllte Strukturen. Als „verdächtige“ Strukturen wurden insbesondere wattenartige Einsenkungen in der Felssohle, charakteristische Kluftmuster oder klein-

räumige Schichtverstellungen und -verbiegungen kartiert.



Abb. 11: Halbseitig freigelegte Einschnittsohle in bankigen Kalken mit ausgeräumten, bindig verfüllten Karststrukturen.

Da sich das Sohniveau der Einschnitte knapp oberhalb des Schwankungsbereiches des tertiären Karstgrundwasserspiegels befindet, wiesen oberflächlich nur geringfügig geöffnete Klüfte in geringeren Tiefenlagen (ca. 0,5 m) teilweise bereits

beträchtliche Öffnungsweiten im Dezimeterbereich auf. Als Hinweise auf sich im Untergrund verbreiternde Strukturen wurden hier z. B. mächtigere Sinterbeläge interpretiert.

Bei den bereits im Rahmen der geologischen Detailkartierung an oberflächlich zugänglichen Karststrukturen durchgeführten ersten Verfüllmaßnahmen mit dünnflüssigem Beton (vergleiche Abs. 5) konnten anhand der eingebrachten Betonmengen, die in Teilbereichen bei an der Oberfläche nur sehr

geringen Öffnungsweiten mehr als 20 m<sup>3</sup> betragen haben, Rückschlüsse auf die im Untergrund vorhandene Verkarstung des Gebirges gewonnen werden.

Zusätzlich zu den von der Felsoberfläche aus gewinnbaren Informationen wurden bei größeren unverfüllten Karststrukturen auch Kamerabefahrungen von der Oberfläche aus durchgeführt, die weitere Hinweise auf Ausbildung und Erstreckung dieser Strukturen erbrachten (Abb. 12).



Abb. 12: Kamerabefahrung offener Spalten in der Einschnittsohle.

## 5 MAßNAHMEN ZUR BAUGRUND-ERTÜCHTIGUNG

Die durchzuführenden Baugrundertüchtigungsmaßnahmen wurden anhand der erstellten Dokumentation und der erkannten Verdachtsbereiche mit der Arbeitsgemeinschaft Streckenbau und dem Arbeitskreis Karst abgestimmt. Als Leitfaden für die generelle Vorgehensweise bei den Sanierungsarbeiten diente dabei ein vom ARBEITSKREIS KARST erarbeiteter Maßnahmenkatalog [1], der in Abhängigkeit der Ausbildung der Karststruktur (laterale Erstreckung, Durchmesser und Tiefenlage) die jeweils zu ergreifenden Maßnahmen vorgibt.

Die im Laufe der Bauausführung ergriffenen Maßnahmen umfassen dabei das nachfolgend näher erläuterte Spektrum (Abs. 5.1-5.4):

### 5.1 Beherrschung von Erdfällen und Senkungsstrukturen

Voraussetzung für die „worst case“-Szenarien eines plötzlichen Erdfalls bzw. langsam ablaufender Einsenkungen im Bereich der Trasse ist das Vorhandensein entsprechend großer, unverfüllter und relativ nahe der Felsoberfläche gelegener Hohlräume. Da entsprechende Hohlräume durch die kombinierte Karsterkundung (siehe Abs. 4) für alle Felseinschnitte des Bauloses Süd ausgeschlossen werden konnten, sind für die Sanierung solcher Bereiche keine bautechnischen Maßnahmen ausgeführt worden.

### 5.2 Vergießen offener Strukturen

Offene Strukturen mit einer Öffnungsweite von über 10 cm wurden mit flüssigem Beton der Körnung 0/8 oder Zementsuspension verfüllt. Diese Maßnahme diente primär der sicheren Verhinde-

rung von Materialabrieselung aus der FSS. Zudem werden eventuell mit der Struktur in Verbindung stehende Hohlräume, die außerhalb des Leistungsbildes der Geophysik liegen, hierbei ebenfalls versiegelt. Im Nachgang werden diese Strukturen durch punktuelle Manschettenrohrinjektionen nachverpresst, um eine vollständige Verfüllung sicherzustellen.

Strukturen mit Öffnungsweiten von unter 10 cm wurden nicht speziell behandelt, da sie durch die in verkarstungsfähigem Untergrund flächig ausgeführte, mindestens 15 cm starke, unbewehrte Beton-Verrieselungsschutzschicht (siehe Abb. 5) überbrückt werden können, die eventuell offene Klüfte und Spalten zur überlagernden Frostschutzschicht hin zuverlässig versiegelt.

Der ursprünglich geplante Einbau eines Geokomposit anstelle der ausgeführten Betonschicht wurde aufgrund der rechnerisch nicht nachweisbaren Beherrschbarkeit der theoretisch anfallenden maximalen Schubkräfte bei einer Vollbremsung des ICE verworfen.

### 5.3 Aushub und Betonverfüllung

Mit bindigen Lockergesteinen (meist  $T_{u*}$ - $T_{u*},g,x$ ) verfüllte Karststrukturen, die im Zuge der Aushubarbeiten erkannt wurden, wurden ab einer Breite von über 30 cm ausgehoben und mit Beton B25 verfüllt. Diese Maßnahme diente der Sicherstellung einer gleichmäßigen Steifigkeit des Untergrundes im Bereich der Tragschicht. Die jeweils erforderliche Austauschtiefe wurde in Abhängigkeit der Abmessungen der Karststruktur gewählt. Überwiegend wurde die Austauschtiefe bei Strukturen mit bis zu 3,0 m Breite mit etwa der halben Breite festgelegt.



Abb. 13: Betonverfüllung einer ausgedehnten, ursprünglich mit bindigem Lockermaterial gefüllten Karststruktur.

### 5.4 Injektionsmaßnahmen

In Bereichen mit ausgedehnten offenen oder potenziell teilverfüllten oberflächennahen Hohlräumen wurden **punktuelle Niederdruckinjektionen** durch Manschettenrohre  $\varnothing 50$  mm mit Suspension auf Zementbasis (erosionsstabil; Druckfestigkeit  $> 10$  N/mm $^2$  nach 28 Tagen) zur Anwendung bis in Tiefen von 5 m ausgeführt. Durch die Verfüllung vorhandener Hohlräume sowie Verfestigung und Stabilisierung evtl. vorhandener Lockergesteinsfüllungen konnten Setzungs-, Nachsack- oder Ausspülungserscheinungen in Karststrukturen ausgeschlossen werden. Es wurden fallbezogen Manschettenabstände zwischen 0,33 und 0,5 m ausgeführt. Als Abbruchkriterium für die jeweiligen Injektionen wurde das Erreichen von 8 bar Injektionsdruck gewählt.

In Bereichen mit großräumigen, unverfüllten Karststrukturen in oberflächennaher Lage wurden **Rasterinjektionsmaßnahmen** mit Niederdruckinjektionen durch Manschettenrohre  $\varnothing 50$  mm mit Füllbinder bis in Tiefen zwischen 5 m und 15 m ausgeführt (Abb. 14). Der Rasterabstand der Injektionsbohrungen wurde individuell in Abhängigkeit der jeweiligen Ausbildung der Karststruktur bzw. der Ausbildung des Karstträgergebirges (Klüftigkeit des Gebirges, Verwitterungsgrad des Kalksteines, Eigenschaften eventuell vorhandener Hohlräumfüllungen) gewählt. Hier kamen Rasterabstände von 1,5 m, 2,5 m und 3,0 m zur Anwendung.



Abb. 14: Injektionsbohrgerät beim Abbohren eines 2,5 m-Injektionsrasters.

Der Sanierungserfolg der Injektionsmaßnahmen wurde nach ausreichendem Erhärten der Suspension durch Kontrollkernbohrungen mit einer Nominaltiefe von 10 m überprüft.

### 5.5 Bodenaustauschmaßnahmen

Neben dm- bis mehrere Meter messenden Strukturen wie Spalten, Hohlräumen oder Dolinen wurden

in einigen Einschnitten auch großräumige Bereiche angetroffen, in denen die Sohle über mehrere 10er-Meter aus heterogen zusammengesetzten, bindigen Lockergesteinen (überwiegend T,u,g,x,y') gebildet wurde. Diese Lockergesteine werden als Versturzmaterial oder Verwitterungsmaterial des anstehenden Felses gedeutet. In Abstimmung zwischen der Arbeitsgemeinschaft Streckenbau, der BÜZ Süd und unter Einbeziehung numerischer Modellierungen am Zentrum Geotechnik der TU München wurden für diese Bereiche individuelle Bodenaustauschmaßnahmen geplant und durchgeführt. Nach Aushub der nicht tragfähigen Lockergesteine auf ein individuell ermitteltes Niveau (überwiegend 1,0 m unter UK FSS) wurde die Tragschicht aus lagenweise verdichteten, weit gestuften Kies-Steingemischen (überwiegend Brechkorn 0/63), bzw. bereichsweise auch mit Magerbeton aufgebaut.

Um plötzliche Steifigkeitssprünge zwischen Bereichen mit Bodenaustausch und benachbarten Bereichen mit auf UK FSS anstehendem Fels zu verhindern, wurden an den Übergängen durchgängige Betonrampen mit einem Längsgefälle von  $\leq 6\%$  ausgeführt.

## 6 FALLBEISPIELE

In Tabelle 1 werden drei Fallbeispiele für charakteristische Abschnitte mit unterschiedlichem Verkarstungsgrad vorgestellt. Sie veranschaulichen eindrucksvoll die Bandbreite der ergriffenen Maßnahmen in Abhängigkeit der geologischen Situation.

## 7 SCHLUSSBETRACHTUNG

Das Bauen in oberflächennahen Karbonatgesteinen wird in vielerlei Hinsicht durch die vielfältigen und sehr wechselhaften Karsterscheinungen in diesem Gebirge geprägt. Die Beherrschung der umfangreichen Probleme und Gefährdungen, denen eine moderne Hochleistungs-Bahnstrecke unter diesen Umständen ausgesetzt ist, wird auch bei zukünftigen Projekten in vergleichbaren geologischen Verhältnissen im Mittelpunkt des Interesses stehen.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Verfahren haben sich im Zuge der Bauausführung der Streckenbauwerke im Baulos Süd der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt bewährt. Den hohen Ansprüchen, die dabei an die ingenieurgeologische Betreuung vor Ort und die Abstimmung aller

Beteiligten gestellt werden, steht eine Vorgehensweise gegenüber, die eine kostenoptimierte und den individuellen Baugrundverhältnissen effektiv angepasste Bauausführung ermöglicht.

## 8 DANKSAGUNG

Wir bedanken uns bei der DB ProjektBau GmbH für ihr Einverständnis zur Publikation der vorliegenden Ergebnisse.

## 9 LITERATUR

- [1] ARBEITSKREIS KARST (2003): Dokument 123 Ref. 0.4 (unveröffentlicht).
- [2] BAUER, M. (2002): Möglichkeiten und Grenzen der Vorerkundung in schwierigen und heterogenen Baugrundverhältnissen.- 8 S., Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik, TU Wien (in Druck).
- [3] HÖWING, K.-D., EDER, S. & PLANK, M. (2003): Baugrunderkundung für Verkehrswege in Karstgebieten.- Felsbau, 21, 1: 13-21.
- [4] LEHMANN, B., RADINGER, A., SCHEIBE, R., PÖTTLER, R. & MICHAEL, J. (2003): Erkundung von Karsthohlräumen/Erdfällen durch Kombination von Bohrungen und Geophysik im Zuge der Errichtung von Hochgeschwindigkeitsstrecken.- in: FEESER, V. (Hrsg.): Berichte von der 14. Tagung für Ingenieurgeologie Kiel, 26.-29. März 2003.
- [5] PÖTTLER, R. & MAIDL, R. (2004): Behandlung der Karstproblematik bei den Tunneln der Neubaustrecken der DB AG.- in: DGQT (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2004: 173-194.
- [6] PÖTTLER, R., SCHNEIDER, V., REHFELD, E. & QUICK, H. (2002): Grundkonzept zur Lösung der Karst- und Erdfallproblematik für den Bau von Verkehrswegen.- Felsbau, 20, 3: 10-21.
- [7] REHFELD, E. & MATTLE, B. (2003): Sicherung von Eisenbahnfahrwegen in verkarsteten und erdfallgefährdeten Gebieten.- Felsbau, 21, 1: 35-41.
- [8] RADINGER, A., SCHEIBE, R., LEHMANN, B. & KAUS, A. (2003): Die Geophysik im Einsatz zur Karst- und Erdfallerkundung im Zuge von Hochleistungsstrecken.- Felsbau, 21, 1: 42ff.

Tabelle 1: Fallbeispiele

	<b>Malmkalk, bankige Fazies, starke Verkarstung</b>	<b>Malmkalk, bankige Fazies, sehr starke Verkarstung</b>	<b>Malmkalk, massive Fazies, sehr starke Verkarstung</b>
<b>Bereich</b>	Einschnitt E4, Bau-km 71+700 – 71+750	Einschnitt E5 Bau-km 72+825 – 72+875	Einschnitt E6, Bau-km 73+480 – 73+520
<b>Planaus- schnitt (ohne Maßstab)</b>			
<b>Lithologie</b>	<b>Tithon, mittelbankige Kalke</b>	<b>Tithon, mittelbankige Kalke</b>	<b>Tithon, massive Dolomitsteine</b>
<b>Verkar- stung</b>	Korrosiv erweiterte Klüfte und vollständig bindig verfüllte Spalten mit Breiten von bis zu mehreren dm. Keine offenen Strukturen.	Umfangreiche bindig verfüllte sowie offene Strukturen, kleinräumige Schichtverstülpungen und Einbruchstrukturen.	Bindig verfüllte Schlotte mit bis zu mehreren m Tiefe und dm- bis m-Breite. Offene, z. T. begehbar Spalten und Hohlräume bis $2,5 \times 3,5 \times 1,5$ m
<b>Ertüchi- gungs- maßnah- men</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Aushub bindiger Karstfüllungen und Verfüllung mit ca. 15 m<sup>3</sup> Beton B25</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Aushub bindiger Karstfüllungen und Verfüllung mit ca. 350 m<sup>3</sup> Beton B25</li> <li>○ 7 strukturbegogene Zusatzbohrungen, 5 m tief</li> <li>○ Niederdruckinjektion von 21 m<sup>3</sup> Zementsuspension</li> <li>○ 1 Kontrollkernbohrung, 10 m tief</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Aushub bindiger Karstfüllungen und Verfüllung mit ca. 1850 m<sup>3</sup> Beton B25</li> <li>○ Injektionsbohrungen in 3m-Raster (66 Stck.), 10 m tief</li> <li>○ 18 strukturbegogene Zusatzbohrungen, 10 m tief</li> <li>○ Niederdruckinjektion von 1032 m<sup>3</sup> Zementsuspension</li> <li>○ 7 Kontrollkernbohrungen, 10 m tief</li> </ul>