

Ermittlung der Lage und Ausbreitung von Karsthohlräumen im Rahmen von Erkundungsarbeiten für unterirdische Verkehrswege mittels optischer Bohrlochbefahrungen

Jens Blumtritt, Tobias Heyn

BLM Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, Niederlassung München

ZUSAMMENFASSUNG

Der zunehmende Bau von unterirdischen Verkehrsweegeanlagen in stark verkarsteten Regionen stellt immer neue Ansprüche an die Vorerkundung der hier auftretenden Karstphänomene, insbesondere die Ausbildung von Hohlräumen.

Zur Erkundung von Karsthohlräumen werden dabei neben geophysikalischen auch verbesserte optische Messverfahren eingesetzt. Zusätzlich zur visuellen Begutachtung von Karsterscheinungen in Bohrungen durch Farbvideoaufnahmen mittels optischer Kamerasysteme ist nun auch die Ermittlung der Lage und Verbreitung von Hohlräumen möglich. Zum Einsatz kommen hierbei TV-Kameras mit integriertem Laser, die eine Vermessung von Hohlräumen bis in Entfernungen von mehreren Metern erlauben.

An ausgewählten Projektbeispielen zu aktuellen Verkehrswegeprojekten werden die messtechnische Umsetzung der integrierten Laservermessung vorgestellt und die aus der Interpretation der Messungen gewonnenen Aussagen näher erläutert.

1 EINLEITUNG

Die Erkundung von Karststrukturen gewinnt in den letzten Jahren im Zusammenhang mit dem weiteren Ausbau von Verkehrswegen für Eisenbahn- und Autoverkehr zunehmend an Wichtigkeit. Die sich vor allem im süddeutschen Raum erstreckenden fränkischen und schwäbischen Albgebirgszüge mit ihren weit verbreiteten Karstphänomenen liegen hierbei direkt in den Verbindungslinien von wichtigen Verkehrsknotenpunkten. Zur Sicherstellung einer effizienten Bauphase anspruchsvoller Trassenführungen mit Tunnelvortrieben und Talquerungen sowie ihrer späteren Stabilität wird zunehmend Aufmerksamkeit auf eine umfangreichere und detailliertere Erkundung des Baugrundes gelegt. Insbesondere die Lage und Verbreitung von Hohlraumstrukturen, die ein nicht unwesentliches Baugrundrisiko sowohl in der Bau- als auch während der Betriebsphase darstellen, haben das Interesse der Bauherren und planenden Ingenieure sensibilisiert.

Die Erkundung von Hohlräumen in ihrer Ausdehnung und Verbreitung verlangt somit nach einem optimierten Einsatz von direkten und indirekten Erkundungsverfahren.

2 KARSTPHÄNOMENE

Aus einer Vielzahl von bereits durchgeführten optischen Bohrlochbefahrungen ergibt sich eine, auf die Aufgabenstellung abzielende Begutachtung der anzutreffenden Karsterscheinungen in bedeckten Karbonaten. Vergleichbare Phänomene lassen sich natürlich auch in Formationen von laugungsfähigen Chloriden und Sulfaten beobachten, werden aber an dieser Stelle nicht weiter behandelt [III].

- Oberflächenverkarstung: meist kleinräumige Erosionsstrukturen im Verwitterungsbereich anstehender Karbonate bedingt durch eindringendes Oberflächenwasser bis in eine Tiefe von wenigen dm bis m. Nur seltenes Antreffen von größeren Kalibererweiterungen.
- Tiefenverkarstung: Diese Verkarstungszone findet sich im Anschluss an den oberflächennahen Verwitterungsbereich und reicht bis in Tiefen von mehreren Zehner m.

Es lassen sich drei häufige Karstphänomene unterscheiden:

- a. voluminöse Zerrüttungszonen mit diffuser Wasserwegsamkeit und meist sehr unregelmäßigen und unorientierten Kaliberaus-

- brüchen von wenigen cm bis dm.
- b. an sedimentäre Grenzflächen und Kluftflächen gebundene, scharf abzugrenzende Verkarstung. Die Kaliberabweichungen in diesem Bereich stehen in enger Abhängigkeit mit der lokalen Wasserwegsamkeit und liegen im Bereich von wenigen cm bis m.
 - c. Karsthohlräume und -höhlen unterschiedlicher Größe und Form, teilweise verfüllt (z.B. tertiäre Bohnerze, Lehm, Sturzmassen, etc.) mit Volumina bis mehrere m³.

3 METHODEN DER KARSTERKUNDUNG

Für die Untersuchung des Baugrundes in stark verkarsteten Regionen werden neben geologischen Kartierungsverfahren bevorzugt flächenhaft und zerstörungsfrei arbeitende geophysikalische Prospektionsverfahren eingesetzt. Sie eignen sich hervorragend, eingesetzt in einer Vorerkundungskampagne, für die Wahl geeigneter Trassenführungen mit gezielter direkter Erkundungstätigkeit (Bohrungen, Sondierungen, etc.). In dieser Hauptphase der Erkundung wird der Baugrund einer möglichen Trasse mit Aufschlussbohrungen detailliert weiter untersucht.

Im Rahmen der anstehenden Aufgabenstellungen werden in diesen Bohrungen sowohl geotechnische als auch geophysikalische und hydrodynamische Untersuchungen ausgeführt. Neben den geotechnischen Messungen *in situ* und am Bohrkern haben sich bohrlochgeophysikalische Messungen etablieren können, da sie eine effiziente, zielführende Ergänzung zum Erkundungsprogramm der jeweiligen Bohrung darstellen. Im Weiteren wird an dieser Stelle explizit auf optische Messverfahren eingegangen, denen insbesondere bei der Erkundung in Karstgebieten eine entscheidende Rolle zufällt. Mit ihrer Hilfe soll ein frühes Erkennen von Lage und Ausbreitung auftretender Karstphänomene, die einen großen Einfluss auf die spätere Bautätigkeit bzw. den Betrieb der Verkehrsstrasse (Baugrundrisikoabschätzung, Untergrundstabilität) haben, möglich werden.

Neben den bildgebenden Verfahren zur Trennflächenanalyse (Optischer Bohrlochscanner [I], [II]) die besonders in Bohrungen mit stabilen und maßhaltigen Bohrlochwandungen gute Ergebnisse liefern, bieten Videokameras mit integriertem Laser die Chance auch größere Ausbrüche in Bohrungen zu erkennen und zu vermessen.

4 EINSATZMÖGLICHKEITEN OPTISCHER BOHRLOCHMESSVERFAHREN

In früheren Erkundungsphasen der 80er und 90er Jahre wurden meist voll schwenkbare Farb-TV-Kameras mit vorgeschaltetem Kompass zur Trennflächenermittlung eingesetzt. Der Vorteil der individuellen Betrachtung von Einzelelementen im Bohrloch stand dem Nachteil der subjektiven Bewertung und häufig ungenauen Ermittlung der Strukturelemente (Klüfte, Schicht- und Schieferungsflächen) gegenüber. Mit der Entwicklung von optischen Bohrlochscannern ist heute eine exaktere und objektivere Trennflächenermittlung möglich geworden. Die TV-Kamera wurde durch bildgebende optische und akustische Scannersysteme, die die Bohrlochwand detailliert richtungsorientiert abbilden, ersetzt [I], [II].

Der Zugang zu geologischen Baugründen mit mehr oder weniger unregelmäßigen und instabilen Gebirgsverhältnissen, wie sie in Karstgebieten häufig anzutreffen sind, brachte der optischen Kamera neue Einsatzchancen. Ihre Möglichkeit der stufenlosen Fokussierbarkeit auch auf weit entfernte Objekte ist für die Ermittlung von erbohrten Hohlräumen in ihrer Lage und Erstreckung von großem Vorteil. Zusätzlich haben die Erfahrungen des Einsatzes von Lasermessgeräten im Tunnelbau oder bei Kavernenuntersuchungen gezeigt, dass diese Messmethode auch auf optische Messungen in geotechnischen Erkundungsbohrungen übertragbar ist.

5 KAMERAMESSTECHNIK

5.1 Vorbemerkungen

Der Einsatz von Bohrlochsonden jeglicher Art (geotechnische, geophysikalische und hydraulische Messsonden) unter komplizierten bohrtechnischen Bedingungen erfordert besondere Anforderungen an Messtechnik und Messpersonal der jeweiligen Serviceunternehmen. Speziell Messungen in mehreren Etappen durch eine Bohrkronen hindurch in ein sehr brüchiges und durch Nachfall gefährdetes Gebirge zwingen zu immer weiteren Miniaturisierungen der Messtechnik bei gleichzeitiger Gewährleistung eines Höchstmaßes an operativer Flexibilität unter kritischen Feldbedingungen. So müssen die eingesetzten Messsonden vor allem Mehrfacheinfahrten durch die Bohrkronen unbeschädigt tolerieren und mögliche Havarierisiken im Bohrloch minimieren. Dies ist durch die Entwicklung vollschwenkbarer TV-Kameras mit Sonden-

durchmessern von ca. 50 mm gewährleistet.

5.2 Mini-TV-Kameraentwicklungen

Die im Folgenden beschriebene und in aktuellen Verkehrswegeprojekten zum Einsatz kommende TV-Kamera (Abb.1) ist eine Entwicklung der Fa. WiWa-VI Arnsberg, welche speziell für Befahrungen unter komplizierten Bohrlochbedingungen adaptiert wurde. Aufgrund ihres geringen Durchmessers von 47 mm sind vielfältige Anwendungen in kleindimensionierten Bohrungen ab Durchmesser von 50 mm möglich, insbesondere Inspektionen von sehr heterogen ausgebildeten Bohrlöchern, wie sie sich häufig in Karstregionen ergeben.

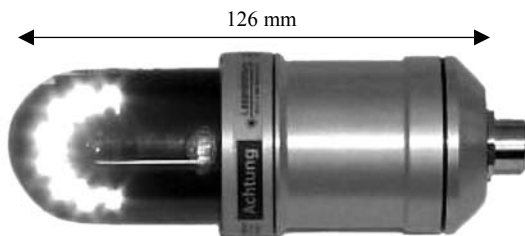


Abb.1: RS-02-PL Projektionslaser-Kamera

Durch Kombination mit einem vor die Kameraeinheit montierten Kompassmodul können alle Blickrichtungen des Objektivs in ihrer Orientierung festgehalten werden. Für die optische Begutachtung bei größeren Bohrlochdurchmessern bzw. im Fall größerer Bohrlochausbrüche kann noch eine Zusatzbeleuchtung zugeschaltet werden. Die Integration eines Kompassmoduls dient auch dem Schutz der optischen Einheit der Kamera vor Beschädigung während der Befahrung. Die komplette Bohrlochsonde ist in Abb.2 dargestellt.

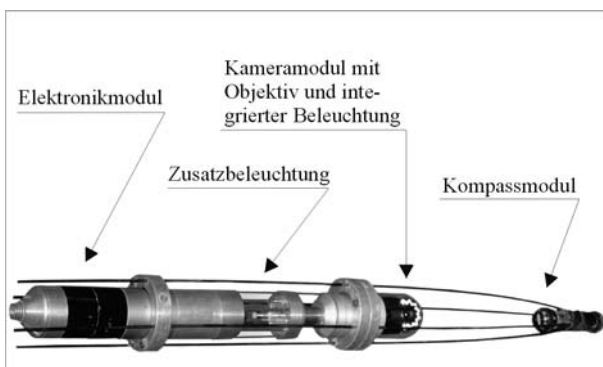


Abb.2: TV-Kamera mit Kompassmodul und Zusatzbeleuchtung

In einer speziellen Ausführungsvariante der Kamera ist unterhalb des Kameraschwenkkopfes zusätzlich ein Projektionslaser eingebaut. Mit seiner Hilfe können Bohrungen hinsichtlich ihres Kalibers und möglicher größerer Kaliberausbrüche vermessen werden. In der folgenden Übersicht sind Kameraparameter und Einsatzbedingungen zusammengefasst.

TECHNISCHE KAMERADATEN – RS-02-PL [IV]

Kameraspezifikation:

Durchmesser:	47 mm
Länge:	126 mm
Videosignal:	50 Hz 75 Ohm PAL
CCD:	625 lines
Lichtempfindlichkeit:	5 Lux
Objektiv:	3,6 mm Weitwinkel unbegrenzt drehbar und um 220° proportional schwenkbar unbegrenzt fokussierbar (0 - ∞)
Ausleuchtung:	21 Hochleistungs-Weißlicht-LED's
Zusatzmodule:	Magnetkompass in axialer Position Zusatzbeleuchtung Projektionslaser (Klasse 2, max. < 1 mW)
Aufzeichnung:	digital (Digital 8 oder DVD)

Einsatzbedingungen:

Temperatur:	bis 50 °C
Druck:	bis 10 bar
Bohrlochmedium:	trocken oder optisch klares Fluid
Bohrlochdurchmesser:	≥ 50 mm

6 KAMERABEFAHRUNGEN IN OFFENEN BOHRUNGEN

6.1 Optische Bohrlochbewertung

Zur Bewertung von Verkarstungserscheinungen sind die Informationen aus Bohrkernen oft ungenügend. Speziell die Bewertung des Grades der Verkarstung (Verwitterungsgrad, Dimension einer Verkarstung hinsichtlich ihrer räumlichen Lage und Ausbreitung) ist nur durch visuelle Beobachtung im Bohrloch selbst möglich. Mittels TV-Kameraaufnahmen erfolgt eine teufengerechte Betrachtung der Bohrlochwand. Unter Zuhilfenahme von Orientierungssystemen (Kompassmodul) sind sämtliche in einer Bohrung anzutreffenden Strukturen detektierbar.

Neben der Bewertung der vielfältigen Verkarstungserscheinungen (Abb.3) sind auch grobe

strukturelle Aussagen zum Gefüge in seiner räumlichen Lage möglich. Dabei werden alle wesentlichen Strukturelemente mit Ansprache der Art der Trennfläche (Unterscheidung Schicht- und Klufflächen) ausgehalten.



Abb.3: Blick auf einen unregelmäßig geformten Karsthohlraum

In Abb.4 ist ein Beispiel für eine steil einfallende Kluft mit einem Einfallen von ca. 70° in westlicher Richtung dokumentiert.



Abb.4: steil einfallende Kluft der Orientierung 280/70

Alle in einer Bohrung aufgenommenen Trennflächen können im Ergebnis in einem Gefügediagramm dargestellt werden (Abb.5). Die statistische Zusammenfassung in den Polpunkt- und Streichrichtungsdiagrammen kann dabei entsprechend der lithologischen und stratigrafischen Gliederung der Bohrung teufenorientiert unterteilt werden.

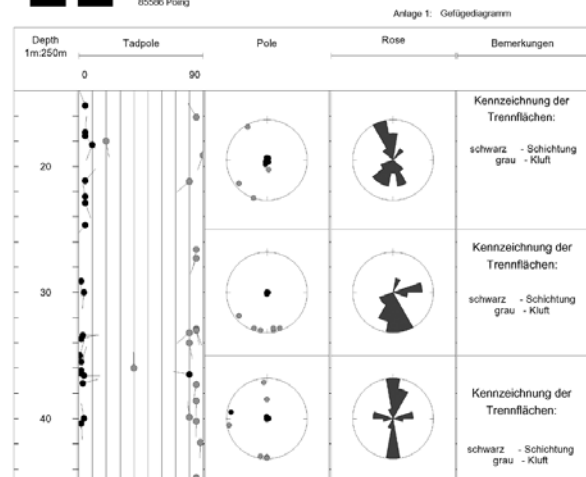


Abb.5: aus einer TV-Befahrung ermitteltes Gefügediagramm

6.2 VERMESSUNG VON KARSTHOHLRÄUMEN MITTELS PROJEKTIONSLASER

6.2.1 Messprinzip

Der unterhalb des Kameraschwenkkopfes positionierte Laser projiziert eine Linie querab vom Kamerakopf. Durch den Schwenkbereich von 110° bis in den Rückwärtsbereich kann diese Linie unter einem Winkel von 70° betrachtet werden. Die Höhe der abgebildeten Linie auf dem Bildschirm ist somit abhängig von der Entfernung zur Bohrlochwand, auf die die Linie projiziert wird [IV]. Der Laser wird vor seinem Einsatz entsprechend seines Wirkungsbereiches (0 – 2 m) einer Entfernungskalibrierung unterzogen. Die Entfernung eines Messpunktes resultiert aus dem Schnittpunkt der auf die Bohrlochwand projizierten Laserlinie mit der Kalibrierkurve (Abb.6). Diese Kalibrierung wird vor jedem Messeinsatz vor Ort nochmals überprüft.

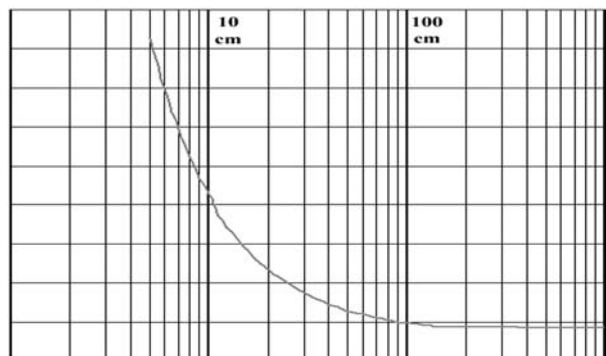


Abb.6: Kalibrierkurve des Projektionslasers

6.2.2 Feldmessungen

Zur Ermittlung der Dimension von Kaliberausbrüchen im Bohrloch sowie zum Erfassen von Hohlraumstrukturen ist in der Kamera ein Laser integriert. Durch gezieltes Zuschalten während der Befahrung kann mit seiner Hilfe die Distanz von der Bohrlochachse zur Bohrlochwand ermittelt werden. Bei systematischem Abfahren des gesamten Bohrlochumfanges ergeben sich dann die aktuellen Durchmesser-Verhältnisse im Bohrloch. Wird dieser Vorgang in diskreten Teufenschritten fortgesetzt, so kann die komplette Kontur eines Bohrloches bzw. erbohrten Hohlraumes ermittelt werden.

Für kleine Bohrlochdurchmesser (50 – 150 mm) sind Entfernungen bis zu 2m von der Bohrlochachse messbar. Größere Hohlräume mit bis zu 10 m horizontale Erstreckung aus der Bohrlochachse können mit einer größeren Kamera mit integriertem Punktlaser nach Aufweiten des Bohrlochs auf mindestens 170 mm vermessen werden. Diese Angaben gelten für trockene Bohrungen. In mit Fluid gefüllten Bohrungen verringert sich die Reichweite des Lasers je nach optischer Transparenz des Fluids.

In den folgenden Beispielen sind ausgewählte Bohrlöchaufnahmen mit Entfernungsbestimmung dargestellt (Abb. 7-8).



Abb.7: Radialblick in einen „Karstpalast“. Entfernung ca. 42 cm

6.2.3 Entfernungsermittlung

Die Ermittlung der Entfernung eines Messpunktes von der Bohrlochachse erfolgt unter Zuhilfenahme einer vorhandenen Kalibrierkurve. Dies kann als erste Abschätzung schon vor Ort während der Befahrung geschehen. Die exakte Entfernungsermittlung

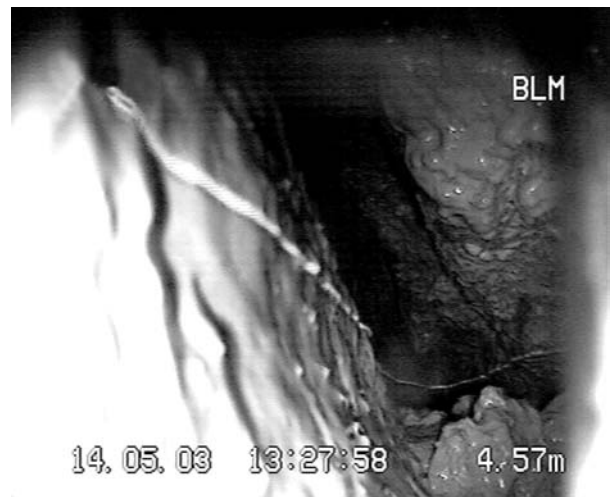


Abb.8: tiefer Kluffkarst, Entfernung ca. 28 cm

lung wird später im Büro an einem Videoarbeitsplatz über interaktive Auswertung am Bildschirm realisiert.

Nach einer detaillierten Vermessung des Bohrloches mit allen darin auffallenden Kaliberabweichungen, werden die Daten mit einer speziellen Software zur Bearbeitung von Bohrlochmessdaten (z.B. WellCAD) in eine grafische Darstellung umgesetzt.

Im Ergebnis entsteht ein teufenabhängiges Mehrarmkaliberlog, welches die Abweichung von der Bohrlochachse in die jeweils vermessenen Richtungen (in der Regel N-E-S-W) angibt. Zur besseren Veranschaulichung kann die Kontur des Bohrloches als 3D-Modell visualisiert sowie sein Volumen abgeschätzt werden (Abb. 9).

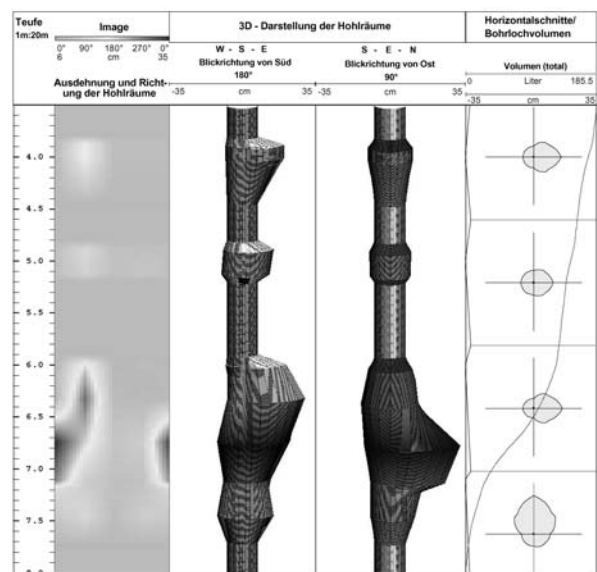


Abb.9: Darstellung der Bohrlochkontur mit Karstausbrüchen

7 Ausblick

Der Einsatz von Videokameras mit integriertem Laser zur Karsterkundung erlaubt eine genauere Abschätzung der Lage und Ausbreitung erbohrter Hohlraumstrukturen.

Mittels ausgewählter Messungen in mehreren Messebenen lassen sich die Entfernungen zur Bohrlochwand punktweise bestimmen. Dieses gewissermaßen noch diskontinuierliche Vermessen einer Bohrung wird zukünftig durch sogenannte Laserbohrlochscanner präzisiert werden. Hier könnte ähnlich zu den Ergebnissen der akustischen und optischen Bohrlochscanner eine kontinuierlich abgewinkelte Bohrlochwand mit radialer Tiefenaussage erhalten werden.

Ein Nachteil der Arbeit mit optischen Lasersonden besteht in der Notwendigkeit einer optisch klaren Sicht bei Arbeit unterhalb des Wasserspiegels. Da dies bei Messungen unmittelbar nach Erreichen der Untersuchungstiefe einer Bohrung nur sehr selten der Fall ist, sind für derartige Bohrlochbedingungen akustische Messverfahren präferiert. Analog dem Sonarverfahren zur Vermessung von Kavernen sind auch hier zukünftig Adaptionen in der Geotechnik denkbar.

LITERATUR

- [I] E. FECKER (1997): Geotechnische Meßgeräte und Feldversuche im Fels, ENKE S.108 ff.
- [II] S. FRICKE & J. SCHÖN (1999): Praktische Bohrlochgeophysik, ENKE, S.111
- [III] H. PRINZ (1991): Abriß der Ingenieurgeologie, ENKE, S.124f.
- [IV] „RS-02-PL Projektionslaser-Kamera“ Produktinformation der Fa. WIWA-VI Arnsberg, 2003.