

Bohrlochgeophysik zur Baugrunderkundung in stark beanspruchten Gebirgsformationen

Jens Blumtritt, Tobias Heyn, Eduard Scheck
BLM Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, Niederlassung München
muenchen@blm-online.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Beurteilung des Baugrundes, insbesondere in geologisch anspruchsvollen Regionen bedarf einer sensiblen Bewertung aller relevanten und nutzbaren Informationen. Da aber vor allem in gelösten und stark gebräuchten Gebirgsbereichen häufig nur ungenügende oder lückenhafte Aussagen aus direkten Aufschlussverfahren möglich sind (Kernverluststrecken, starker Zerlegungsgrad des Gebirges, Lösungserscheinungen), kommen indirekten geophysikalischen Erkundungsverfahren eine gewichtige Bedeutung zu. Im folgenden Beitrag wird hierbei ausschließlich auf bohrlochgeophysikalische Erkundungsverfahren Bezug genommen. An Beispielen in der Praxis zur Erkundung des Baugrundes in besonders beanspruchten geologischen Formationen werden Chancen zur Erzielung einer größeren und breiteren Datendichte mit Hilfe der Interpretation bohrlochgeophysikalischer Messergebnisse aufgezeigt.

1. EINLEITUNG

Gutachter und Planer sehen sich heute, in Zeiten steigenden Flächenbedarfs, mit einer Qualität von Baugründen konfrontiert, die hinsichtlich ihrer ökonomischen Relevanz noch vor einigen Jahren nur unter besonderen Bedingungen in weitere Bauphasen geführt worden wären. Auch wenn die ingenieurgeologischen und bautechnischen Fortschritte manch geotechnische Hürde sicherer und auch kostengünstiger zu nehmen erlaubt, bleibt gerade bei hoch beanspruchten Gebirgsformationen ein planerisches Restrisiko, welches, wie uns die Erfahrung gezeigt hat, nicht unerheblich sein kann. Beispiele wie der innerstädtischer Verkehrswegebau in heterogenem Untergrund oder die Hebungsproblematik bei Aufschluss von Anhydrit im Baugrund haben die Branche in den Focus der Öffentlichkeit gerückt. Planungssicherheit als Rückgrat der Ausführenden geht unmittelbar einher mit dem Untersuchungs- und Modellierungsaufwand. Neben vielen anderen Informationsquellen ist die Bohrlochgeophysik in der Lage, eine entscheidende

Rolle bei der Bestimmung von in Situ-Kennwerten zu übernehmen. Keine andere Methode erlaubt es, mit vergleichsweise geringem Aufwand, unter Ausnutzung der ohnedies meistens abgeteuften Aufschlussbohrungen, entsprechend wertvolle Parameter und Bodenkennwerte zu bestimmen.

Die klassische Bohrlochgeophysik hält mit den bautechnischen Veränderungen Schritt und versucht als unabhängiger Partner der Bauwirtschaft mit neuen Verfahren und Interpretationswegen bei anspruchsvollen Projekten zur Seite zu stehen.

2. KLASSIFIZIERUNG EINES BEANSPRUCHTEN BAUGRUNDS

Die Ansprache und Definition eines über geologische Zeiträume gewachsenen und veränderten Untergrundes erfolgt nach dem klassischen Modell der Geländestudie. Natürliche Aufschlüsse, Bohrungen und Schürfe decken im Idealfall, je nach Intensität des Untersuchungsumfangs, die Genese und Geschichte des Untersuchungsgebietes weitgehend auf.

Der Kreislauf der Gesteine vom Magma, Festgestein, Verwitterung, Umlagerung zum Sediment mit anschließender Diagenese, Tektonik und erneuter Verwitterung bildet dabei den, im Groben einfachen, im Detail jedoch häufig komplizierten Rahmen.

Das Bild, das der Geologe aus seinen Studien gewinnt, stellt immer die Summe aller Wirkungen dar, die sich im Laufe der Zeit auf einen Gebirgskörper aufsummiert haben, wobei sich einzelne Phasen nur noch indirekt nachweisen lassen können oder auch in einer Kausalreihe verbunden sind, indem sie sich nachfolgend überhaupt erst ermöglichen oder aber auch verstärken und beschleunigen.

Unabhängig von Gesteinstyp (Kristallin- oder Sedimentgestein) können prinzipiell drei natürliche Mechanismen einem ungestörten Gestein zusetzen. Anthropogenen Eingriffen (Gebäudesetzungen mechanisch/abrasive Zerlegung, Bodenverbesserung etc.) in das natürliche Gefüge wird in der vorliegenden Zusammenfassung keine Rechnung gezollt. Wichtiger hingegen ist die Trennung fester, halbfester und/oder veränderlich fester Gesteine von Lockergesteinen. Letztere erfahren, ob ihres frühen Diagenesestadiums, in der Regel nur wenige der im Folgenden aufgeführten Beanspruchungen. Dennoch finden bei diesen auch gewisse Parallelen zum Festgestein, die nicht unerwähnt bleiben sollen.

2.1. GEOLOGISCHE BEANSPRUCHUNG

Ausgehend von einem ungestörten Festgestein (erstarrter Magmatit, diagenetisch verfestigte Sedimente) tragen meist orogene Kräfte s.l., aber auch diagenetische Prozesse oder Abkühlung (z.B. Kontraktion) von Gesteinen zu einer Verformung bei, die sich in Abhängigkeit vom Gesteinstyp in Falten-Deckenbau, Diapirismus etc. mit einhergehender Zerlegung entlang von Trennflächen im Gestein bzw. im Gebirge äußert.

Diese tektonischen Elemente sind stark mit der zum Zeitpunkt der Kluftentstehung herrschenden Hauptspannungsrichtung verbunden und können durch weitere Spannungen und deren Folgen überprägt werden.

Als Folge einer Stresskompensation, ausgelöst durch tektonisch bedingte Bewegungen, reagieren Gesteine mit plastischem (inkompetente Gesteine) oder elastischen (kompetente Gesteine) Verhalten. Spuren einer elastischen bis bruchhaften Verformung finden sich mit wenigen Ausnahmen (z.B. Salz, Kohle) in allen Festgesteinsarten in Form von Klüftung s.l. und Faltung wieder (vgl. Abb.1-3).

Eine Vorhandene Klüftung schwächt grundsätzlich den Gesteinsverband, wobei der Entfestigungsgrad

stark an die Trennflächendichte und Trennflächenorientierung gekoppelt ist. Vorgegebene Schwächezonen

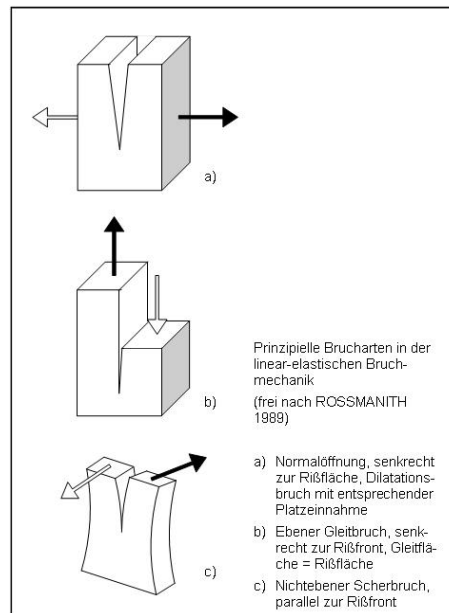


Abb. 1: Grundlegende Bruchmechanismen in der Felsmechanik

im Gestein (Schichtung/Schieferung, Entmischungsgrenzen etc.) setzen die Belastbarkeit ebenso weiter herab, wie eine ungenügende Zementation der Ge-

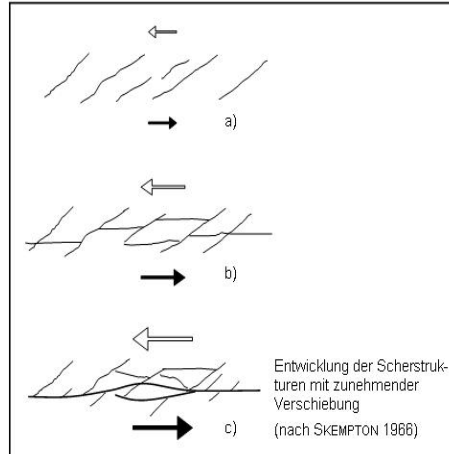


Abb. 2: Entwicklung der Scherstrukturen mit zunehmendem Verschiebungsgrad

steinsmatrix.

So ist die mechanische Belastung am Beispiel eines gleichen Gesteinstyps an zwei extremen geologischen Settings (z.B. Kraton, Kollisionsorogen) nachvollziehbar sehr unterschiedlich.

Mehrstoffsysteme wie die Flyschabfolge in Abb. 3 zeigen sehr heterogene Verformungseigenschaften, wo ein Großteil der Kinetik in inkompetente, duktile Tonsteinschichten abgeleitet werden kann und rheologisch

stabilere Kalksteine als eine Art Form gebendes Gerüst resistieren.



Abb. 3: Beispiel eines hochgradig anisotropen Baugrundes aus der Flyschzone am oberbayerischen Alpenrand (Lainbachtal)

Sekundäre mineralische und metamorphe Umwandlungen bei steigendem Druck und Temperatur sind in der Lage, vormals geschwächte Gesteinseinheiten zu restabilisieren, wie am Beispiel von Gneissen pelitschen Ursprungs oder mit Calcit rekristallisierten und ausgefüllten Bruchflächen an triassischen Kalken der Nördlichen Kalkalpen (z.B. Kalke der Raibler Schichten) gezeigt werden kann.

2.2. PHYSIKALISCHE BEANSPRUCHUNG

Neben den tektonischen Ereignissen zeichnen sich auch physikalische Faktoren verantwortlich für eine zusätzliche Beanspruchung eines Gesteinskörpers. Als physikalisch relevante Größen sind neben Temperatur und Abrasivität, vor allem durch den Wasserkreislauf, auch Differenzen im Überlagerungs- bzw. Setzungs-

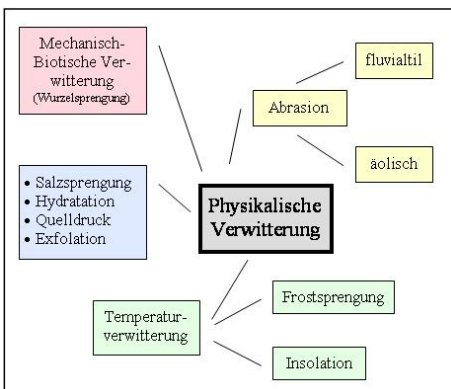


Abb. 4: Allgemeine physikalische Verwitterung

druck zu nennen. Erstere sind im weiten Feld der allgemeinen Verwitterung und Erosion angesiedelt, wo die Summe exogener Prozesse überwiegend oberflächennahe Bereiche beeinflusst (vgl. Abb. 4).

Der anthropogene Eingriff in ungestörte Systeme kann bei ungünstigen Konstellationen gravierende Reaktionen hervorrufen, wenn z.B. Andyrite durch plötzliche Wasseraufnahme eine Volumenzunahme um 50 % erfahren, oder beim Auffahren eines Tunnelbauwerks im dichten, druckhaften Gebirge Abplatzungen an Firse und Ulme auftreten.

Letzteren fallen gravitative Kräfte zu, die durch morphologische Gegebenheiten (starkes Relief) oder alternierende Be- und Entlastung entstehen. So spielen hierbei Hebungen in noch aktiven Orogengürteln (z.B.

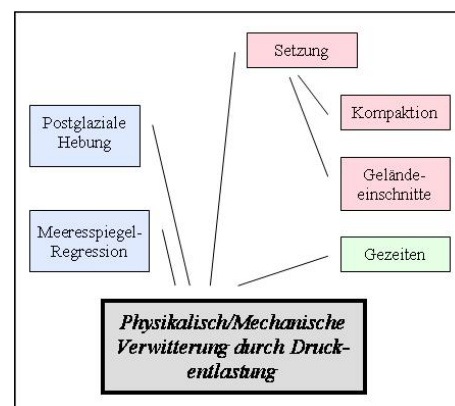


Abb. 5: Physikalisch/Mechanisch angreifende Verwitterung

Alpenraum) oder der fehlende Überlagerungsdruck nach der letzten Eiszeit eine Rolle (z.B. Exfoliation).

Rezente Phänomene wie der Rückzug von Gletschern im Speziellen und Permafrost im Allgemeinen in größere Höhen während der aktuell durchlaufenen Warmphase und der damit verbundenen Freilegung mitunter steiler Gebirgs- und Moränenflanken, sowie die Entfestigung durch das längere, saisonale Auftauen von Permafrostböden in polaren Gebieten, stellen Geologen und Ingenieure zunehmend vor Herausforderungen, die gerade im stark bewirtschafteten und vielseitig genutzten Alpenraum besonders an Bedeutung gewinnen.

Weniger im überregionalen Maßstab, aber dennoch mit hohem Entfestigungspotential fallen exogene physikalische Kräfte wie Meteoriteneinschläge mit entsprechender Impakttektonik. Weltweit und täglich wiederkehrend dagegen sind die Gezeiten, die ihre Wirkung nicht nur auf die Meere beschränken, sondern auch, in verzögerter Periode und reduzierter Amplitude, auf die feste Erdkruste wirken und eine noch nicht vollständig erforschte Mikrotektonik zu Folge haben.

2.3. CHEMISCHE BEANSPRUCHUNG

Mit Beginn der Diagenese setzen nicht selten chemische Umwandlungen im Gestein ein, die sich über geologische Zeiträume hinweg stark auf den Gesteinskörper auswirken können. Am geläufigsten sind Lösungserscheinungen, die zumeist in Salz- und Karbonat- und Sulfatgesteinen auftreten und in Abhängigkeit vom Säure- bzw. Ionengehalt reaktiver Wässer und dem zu lösenden Gestein unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. In Extremfällen führen diese Vorgänge bis zur kompletten Auslaugung mit begleitender Hohlraumbildung in beträchtlichem Ausmaß.

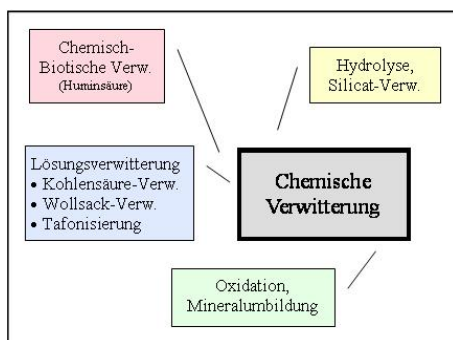


Abb. 6: Chemische Verwitterung

Weitere Verwitterungsarten wie Oxidation und Hydrolyse führen zu Mineralum- bzw. Neubildungen. Die vertikale Reichweite der Verwitterung durch die verschiedenen Mechanismen ist generell eng mit dem Vermögen des Stoffaustauschs innerhalb des Gesteins, bzw. mit der Wasserwegsamkeit verbunden. Der Zerlegungsgrad eines Gesteins bestimmt die Reaktionsfläche und somit die Reaktionsgeschwindigkeit der chemischen Verwitterung.

3. DATENGRUNDLAGE BAUGRUND

Die Ingenieurgeologie sieht sich bei der Bauwerksplanung nicht selten mit einem Baugrund konfrontiert, der einen oder gar Kombinationen aus den vorgenannten Beanspruchungsmechanismen aufweist. Neben der klassischen, oberflächennahen Geländeaufnahme sind heute weiterreichende Erkundungsmaßnahmen üblich, die dem Planer die notwendige Datengrundlage liefert. Dazu zählen neben Oberflächengeophysikalischen Untersuchungen insbesondere der Baugrundaufschluss über Bohrungen. Letztere setzen zwar den gerätetechnisch größten Aufwand voraus, bieten aber mit der möglichen Kern- bzw. Bohrgutansprache und der Möglichkeit von in Situ Tests in der Bohrung in zweierlei Hinsicht den gesichertsten Lösungsansatz bei der Bewertung ungeklärter Untergrundmodelle.

Aufschlussbohrungen im Allgemeinen, und Kernbohrungen im Speziellen sind in wenig gestörten, festen Gebirgen, sowohl planbar niederzubringen, als auch idR. bei guter Probenqualität sicher anzusprechen. Die Auswirkungen von Anpressdruck, Vibrationen und Mantelreibung sind gering, wodurch eine vergleichsweise ungestörte Bodenprobe gewonnen werden kann. In weniger festen Gesteinen hingegen hat selbst das langsame Vordringen einer schneidenden Kernbohrkrone destruktive Auswirkungen auf den Kern (vgl. Abb.7).



Abb.7: Im geotechnischen Sinn kaum brauchbarer Bohrkern. Kantengerundete Bruchstücke zeugen von rotierenden Klasten im Kernrohr (Trockenkernverfahren).

Durch engständige Klüftung zerlegte Bohrkern verlieren selbst bei vorsichtiger Bergung über Tage ihren Verband und liegen häufig bruchstückhaft, oder gar bereits kantengerundet vor (vgl. Abb.8)



Abb. 8: Durch engständige Klüftung zerlegter Bohrkern

Unsanftes Herausklappen verkeilter Kernstücke aus dem Kernrohr trägt ebenfalls nicht zur Gewinnung einer ungestörten Probe bei. Die Lagerung der Kerne wirkt sich zudem negativ auf die Probenqualität aus, wenn Umgebungsdruck und Bergfeuchte fehlen oder gar Frost seinen physikalischen Beitrag liefert.

Ist das Gebirge durch natürliche oder anthropogene Einwirkungen derart beansprucht, dass die lithologische und rheologische Ansprache anhand von Bohrkernen nicht mehr oder nur sehr eingeschränkt möglich ist, werden Bohrlochmessungen zur Sicherung der Baugrundinformationen unentbehrlich.

Der Ansatz bohrlochgeophysikalischer Methoden liegt, anders als die Kernansprache des Geologen und

die Ergebnisse des Prüflabors, im Untersuchungshorizont selber. Dort wo realistische Daten gefordert sind, nehmen Kennwerte wie Dichte, Wassergehalt, Porenraum, Porenwasserdruck, u.a. letztlich eine maßgebliche Rolle ein. Auch wenn eine Bohrung immer eine Störung des Untergrundes darstellt, sei es durch die Erschütterungen und Kräfteableitung während des Bohrens oder die Entlastung bohrlochwandnaher Bereiche durch den Kontakt mit der Atmosphäre bzw. der Spülung und deren, gegenüber der natürlichen Überlagerung, reduzierten Auflastdrücken, so bleiben dennoch viele relevante Bedingungen erhalten. Hier greift die Bohrlochgeophysik an und liefert in Situ-Daten, die anderweitig nur näherungsweise abgeleitet oder interpretiert werden können.

3.1. BOHRLOCHGEOPHYSIKALISCHE ERKUNDUNGSVERFAHREN IN DER GEOTECHNIK

In den letzten Jahren haben sich aus geotechnischer Sicht einige Erkundungsverfahren und Kombinationen daraus in Planungen und entsprechenden Ausschreibungen bereits etabliert. Die Ergebnisse bilden heute eine verlässliche Quelle an Daten, die eine realistische Modellierung eines unklaren Baugrundes unterstützen oder gar erst möglich machen.

Im Folgenden werden die Einzelzielstellungen zusammen mit den damit verknüpften Messverfahren kurz vorgestellt.

- Ermittlung geometrischer Parameter der Bohrung. Räumliche Lage der Bohrung und Durchmesserbestimmung (Korrektiv für alle Messverfahren.
 - Bohrlochabweichung (BA)
 - Kaliber (CAL)
- Ermittlung von Gefügemerkmalen, insbesondere deren qualitative und quantitative Eigenschaften (Differenzierung von Schicht-/Schiefer- und Klufflächen sowie Unterscheidung von geschlossenen und offenen Flächen, Ermittlung von Raumlage, Häufigkeit und Öffnungsweiten) in Bezug auf potenziell wasserführende Gefügeelemente.
 - Optischer Bohrlochscanner (OBI/OPTV)
 - Akustischer Bohrlochscanner (ABF)
- Rekonstruktion aktueller Stressfelder und Hauptspannungsrichtungen in Bohrungen durch Breakout-Analyse charakteristischer Bohrlochausbrüche.
 - Akustischer Bohrlochscanner (ABF)
- Ermittlung lithologischer und lithostratigraphischer Einheiten und Schichtgrenzen in Sedimentgesteinen nach geophysikalischen und optischen Methoden.
 - Gamma Ray (GR)
 - Fokussierter Widerstand (FEL)
 - Gamma-Gamma-Dichte (GGD)
 - Neutron-Neutron (NN)
 - Full Wave Sonic (FWS)
 - Optischer Bohrlochscanner (OBI/OPTV)
- Bestimmung petrophysikalischer Schichtparameter (Dichte, Wassergehalt, Porosität) und Ableitung geotechnischer Kennwerte (E_{dyn} , G_{dyn} , K_{dyn} , η)
 - Gamma-Gamma-Dichte (GGD)
 - Neutron-Neutron (NN)
 - Full Wave Sonic (FWS)
- Erkennen von Entfestigungs-, Zersatz- und Störungszonen, Trennung von verwitterungszone und Festgestein.
 - Fokussierter Widerstand (FEL)
 - Gamma-Gamma-Dichte (GGD)
 - Full Wave Sonic (FWS)
 - Optischer Bohrlochscanner (OBI/OPTV)
 - Akustischer Bohrlochscanner (ABF)
- Erkundung und Vermessung trockener und Wasser gefüllter, natürlicher wie künstlicher Hohlraumstrukturen
 - Laser-Scanner
 - Sonar-Scanner
- Bestimmung wasserführender Zonen und deren Quantifizierung (Zuflussprofilierung) und hydrophysikalische Differenzierung (Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotenzial, Sauerstoffgehalt und Trübung)
 - Leitfähigkeit/Temperatur (FCON/FTEMP)
 - Flowmeter (FLOW) oder alternativ Tracer Fluid Logging (TFL) bei geringen Fließmengen
 - Trübung (TM)
 - Milieu-Multiparameter (MIL)
 - Optischer Bohrlochscanner (OBI/OPTV) zur exakten Eingrenzung von Kluffwasserleitern (ohne Quantifizierung)

Die Umsetzung der Erkundungsziele wird innerhalb eines gezielt geplanten und kurzfristig umgesetzten Messprogramms realisiert. Um das volle Potential der Messverfahren aufschöpfen zu können, sollte mit dem betreuenden Fachbüro und dem Bohrunternehmen sowohl inhaltlich als auch ein zeitlich abgestimmtes Messregime festgelegt werden. Dies richtet sich zum einen nach den Gegebenheiten an der Bohrung (Wasserstand, Spülungseigenschaften, Bohrloch-

stabilität und Kerngewinn- und Qualität) sowie nach den Projektzielstellungen.

4. ANWENDUNGSFÄLLE

Die geologische Situation bietet, gerade in Süd-Deutschland, einen reichhaltigen Fundus an unterschiedlichsten Beispielen für anspruchsvolle Baugründe. Seit Langem erosiven Kräften ausgesetzte karbonatisch/sulfatische Fazies, Anhydrit/Gips-Problematik als Begleiter moderner Geothermieprojekte, tektonisch stark überprägte, alpine Formationen mit heterogenen Komponenten, komplizierte hydraulische Gegebenheiten innerhalb von Heilwasserschutzgebieten oder Wiederherstellung alter Deponieflächen sind einige der Aufgabengebiete, die mit Angewandter Geophysik berechenbar geworden ist. Im Folgenden werden einige Baugrundszenerarien vorgestellt und die Erkenntnisse aus den geophysikalischen Bohrlochmessungen dargelegt.

4.1. ERMITTLUNG DYNAMISCHER GEBIRGS-PARAMETER AN DER STARK GEBRÄCHEN BASIS UNTERHALB EINES SCHLEUSENBAUWERKS

An einem Beispiel zur Erkundung des Baugrundes im Zuge der Sanierung eines Schleusenwerks im teilweise stark ausgelaugten Gebirgsformationen werden anhand einer Reihe von Messverfahren (CAL, GGD, FWS) dynamische Parameter bestimmt, die zusammen mit der gewonnenen Dichteinformation die Grundlage für Elastische Moduli und Poissonzahlen darstellen (vgl. Abb.9).

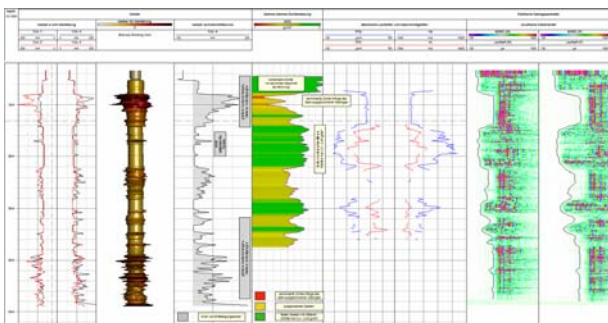


Abb. 9: Bestimmung seismischer in Situ-Geschwindigkeiten und Lagerungsdichten mittels Full-Wave-Sonic (FWS) und Gamma-Gamma Dichtemessungen (GGD).

Die Kernqualität an dieser Stelle hatte stellenweise Lockergesteinscharakter, wie sowohl in Abb. 9 anhand der Dichtemessung als auch in Abb.10 anhand der zusätzlich durchgeführten Akustischen Scannermessung (ABF) leicht nachvollzogen werden kann.

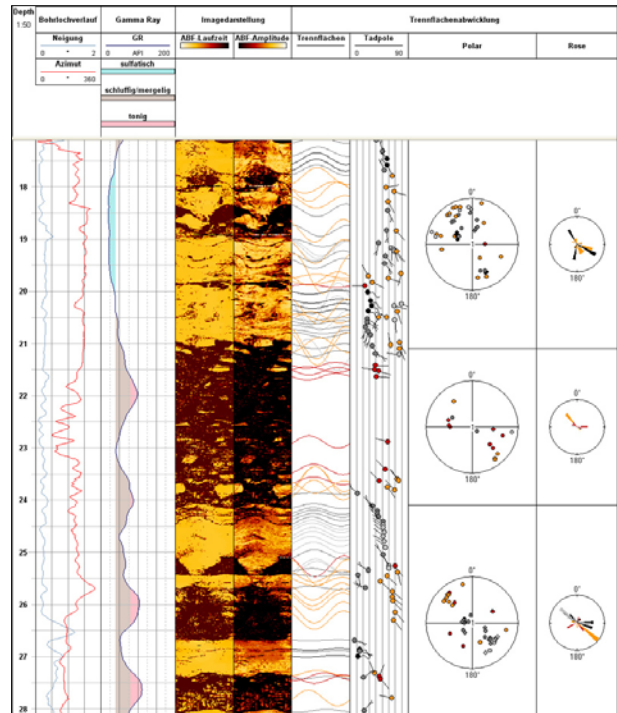


Abb.10: Strukturanalyse in einer stark nachbrüchigen Bohrung. Deutliche Schrägstellung strukturell isolierter Blöcke in karbonatisch/sulfatischer Fazies mit starken Lösungserscheinungen.

Die Strukturanalyse in dieser Bohrung deckt Anzeichen von Bruch- bzw. Setzungstektonik auf. Einzelne kleine Blöcke „schwimmen“ förmlich in einer weichen, bindigen Matrix, andere, größere Blöcke wiederum sind mit bis zu 30° Neigungsdifferenz verkippt, was auf Bruchschollen im Zuge eines Hohlraumkollapses zurückgeführt werden kann.

4.2. HOHLRAUMERKUNDUNG UND STRUKTURANALYSE IM ZUGE DER SANIERUNG EINES PUMPSPEICHERWERKS

Die Malm-Karbonate der Schwäbisch-Fränkischen Alb liegen teilweise seit der Kreide frei und sind über weite Gebiete stark verkarstet. Die Heterogenität der Kalksteine reicht von praktisch kluftfreien Treuchtlinger Marmor bis hin zu Dolinenfeldern und Karsthöhlen. Das Beispiel zeigt beide Charakteristiken, wobei die Verkarstungshohlräume meist mit tertiären Tonen verfüllt sind. Fehlen diese Füllungen, dann können kleinräumige Erdfälle auftreten, die, in Verbindung mit oberflächlich anstehenden und alternierend hohen Wasserdrücken, zu Problemen führen.

Mit der Zielstellung, die Kernqualität auf Vollständigkeit aller Komponenten, inklusive allfälliger, bindiger Karstverfüllungen, hin zu optimieren, wurde überwiegend auf Wasserspülung während der Bohrarbeiten verzichtet. Erst bei ausgewählten (Wasser-)Spülbohrungen zeigte sich durch das Ausspülen bindiger Kom-

ponenten der wahre Verkarstungsgrad- und, wie die Optische Bohrlochscanneraufnahme in Abb.11 aufdeckt, die Dimension (man beachte den Maßstab!)

Die Breakout Analyse, noch Neuland in der Geotechnik, bietet die Möglichkeit, charakteristische

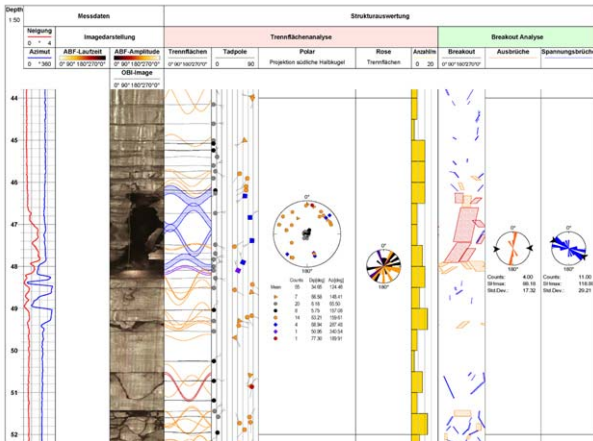


Abb.11: Strukturanalyse mit Trennflächenstatistik und Breakout Analyse. Ausgespülte Feinkornfüllungen decken die wahre Dimension der Verkarstung auf.

Bohrlochwandausbrüche auf statistischer Basis in einen regionaltektonischen Kontext zu setzen und die Ausbruchflächen zu bemessen.

Das Ergebnis aus den strukturellen Untersuchungen an mehr als 50 Bohrungen zeigt, dass das elastische Bruchverhalten der anstehenden Kalksteine alte, alpidische Stressfelder in Form von überregionalen Kluffrichtungen bewahrt.

4.3. HYDRAULISCH HOCHKOMPLEXE BE- DINGUNGEN IN KÜSTENNÄHE

Küstennahe Baugründe nehmen wegen ihrer exponierten Lage, der allgegenwärtigen physikalisch-chemischen Verwitterung und deren Auswirkungen auf das Gebirge, eine Sonderstellung ein. Im vorgestellten Beispiel lag die Problematik, die überhaupt erst zur geophysikalischen Untersuchung geführt hat, darin, dass es auch unter hohem technischen Einsatz nicht gelingen wollte, einen Baugrund zu Testzwecken über mehrere Vereisungsphasen gleichmäßig zu vereisen. Zu bemerken sei, dass das in Südeuropäischen Breiten gelegene Untersuchungsgebiet Jahresmitteltemperaturen zeigte, die sich in ungewöhnlich hohen Grundwassertemperaturen widerspiegeln. Läuft die Entwässerung zudem aus einem steilen Relief nahe der Oberfläche ins Meer, kann sich am Kontakt zum Salzwasser ein hochkomplexes Mischsystem bilden. Als zusätzliche Komponente paust sich eine starke, küstenparallele Strömung in den grobklastischen, sandigen Untergrund ab.

Mit Hilfe geophysikalischer Methoden konnte ein Süßwasserfließregime detektiert werden, dessen horizontaler Wärmetransport bei hohen Durchlässigkeiten die Vereisung vereitelte. Das zudem bestehende, vertikale Salzwasserfließregime, welches unterhalb des Süßwasserhorizonts über die Bohrung schneller entwässert, liegt in einem Bereich mit deutlich geringeren Durchlässigkeiten und konnte trotz gefrierhemmendem Salzgehalt problemlos vereist werden. Dieser Widerspruch ist durch einen hydraulischen Kurzschluss innerhalb der Salzwasserzone zu erklären (vgl. Abb.12).

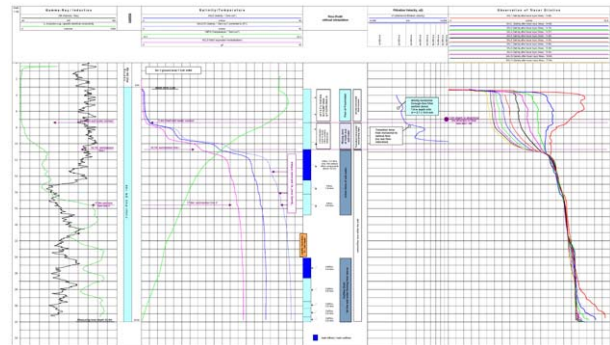


Abb.12: Auszug aus einem komplexen hydraulischen Messprogramm zur Bestimmung von Fließregimen unterschiedlich salinärer Wässer.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Dynamik der Erdkruste macht auch vor dem Baugrund nicht Halt. Geologische Zeiträume aber auch abrupte Ereignisse setzen dem Untergrund auf unterschiedlichste Weise zu. Fester Fels zerbricht, wird oberflächlich mürbe und statisch nicht mehr belastbar. Karbonatplattformen werden angelöst und bilden Hohlräume, alte Bergbaustollen gelangen erst nach deren Kollaps wieder ins Bewusstsein. Die stark beanspruchte Geologie wird erst dann zur technischen Herausforderung, wenn diese zum Baugrund avanciert oder, je nach Betrachtungsweise, degradiert wird

Es existiert bereits eine Reihe von Methoden zur Bewältigung schwieriger Aufgabenstellungen und diese werden in der Tiefbauwirtschaft ebenso erfolgreich eingesetzt wie vorangetrieben. Die Bohrlochgeophysik, als ein Teil der investigativen Baudiensteile, blickt über das Mittel der Bohrung gleichermaßen minimalinvasiv wie auch kostengünstig, gleichsam einem endoskopischen Eingriff, in den Untergrund und gewinnt dadurch wirklichkeitsnahe Erkenntnisse, die zum einen schnell verfügbar sind und zum anderen die Nachteile der geotechnischen Probenahme umgehen.

Literatur

- I. J. Blumtritt & T. Heyn & J.-P. Crabeil (2006): Ermittlung der Lage und Ausbreitung von Karsthohlräumen im Rahmen von Erkundungsarbeiten für unterirdische Verkehrswege mittels optischer Bohrlochbefahrungen, 5. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Ostfildern
- II. J. Blumtritt (2007): Geophysikalische Bohrlochmessungen als integraler Bestandteil einer geotechnischen Baugrunderkundung, Workshop Bohrlochgeophysik und Geothermie, München
- III. J. Blumtritt & M. Lehmer (2008): Integrierte bohrlochgeophysikalische Erkundung von Klufftgrundwasserleitern durch Betrachtung von Gefügemerkmalen und hydrodynamischer Aktivität, 6. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Ostfildern
- IV. S. Fricke & J. Schön (1999): Praktische Bohrlochgeophysik, ENKE
- V. H. Prinz (1991): Abriss der Ingenieurgeologie, ENKE, S.124f.
- VI. H.-P. Rossmannith (1989): Felsbruchmechanik – eine kurze Einführung.- Österr. Ing.- u. Architektenzeitschr. (ÖIAZ), Wien
- VII. A.W. Skempton (1966): Some Observations on the tectonic shear zones. – Proc. 1 st. Congr. ISMR Lissabon, Bd. 1
- VIII. W. Freudenberger & K. Schwerd (1996), Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern, Bayerisches Geologisches Landesamt, München