

**bbr**  
Leitungsbau  
Brunnenbau  
Geothermie

**JAHRES**  
**MAGAZIN**



**DIE HDD-E SERIE**  
VOLLELEKTRISCHE  
HORIZONTALBOHRANLAGEN

**UMWELTFREUNDLICH**  
**UND INNOVATIV**

- Leise
- Fortschrittlich
- Sicher
- Leistungsstark
- Zukunftsweisend





# Sensorgestützte mineralogisch-chemische und optische Bohrkerndokumentation und -analyse

Die Auffindung und Exploration von Lagerstätten verlagert sich weltweit zunehmend in abgelegene Regionen und größere Tiefen. Dadurch bedingt steigen die Explorationskosten und damit auch das wirtschaftliche Risiko einer Fehlinvestition. Aktuelle Megatrends für den Explorations- und Bergbausektor deuten auf eine steigende Nachfrage nach Automatisierung, Digitalisierung und maschinellem Lernen hin. Ziel dabei ist es, interdisziplinäre Abläufe zeitlich und qualitativ zu optimieren, indem vernetzte und konsistente Daten in Echtzeit zuverlässige Voraussagen zur Entscheidungsfindung beitragen.

**Beginnend mit der** Frühphase einer Erkundung bis einschließlich zur produktiven Abbauphase einer Lagerstätte werden bedeutende Mengen an Bohrkernen erbohrt. Nicht selten summieren sich während einer Bohrkampagne verteilt auf etliche Bohrungen zehntausende Meter Bohrkern auf, die zeitnah von Geologen lithologisch, mineralogisch, geotechnisch und geochemisch angesprochen und protokolliert werden. Systematisch werden große Mengen an Bohrkernen beprobt und in akkreditierten Laboren auf ihre chemische und mineralogische Zusammensetzung untersucht. Basierend auf diesen Laborergebnissen wird dann das weitere Vorgehen der Erkundung bis hin zur Bewertung der Lagerstätte geplant, die zu erwartenden Fördermengen berechnet und die Methodik der Erzaufbereitung vorbereitet.

Zusätzlich zu den logistischen Herausforderungen, die mit dem Probentransport verbunden sind, kommen bedeutende Laborkosten und nicht selten wochenlange Bearbeitungszeiten hinzu, die zu zeitlichen Verzögerungen und langen Standzeiten führen. Sensorbasierte Bohrkernanalytik an der Bohrstelle, in Kombination mit Echtzeitdatenverarbeitung können hier Abhilfe schaffen.

ANCORELOG ist ein neuartiger Bohrkernscanner, der modular mit unterschiedlichen analytischen Sensoren bestückt werden kann (Abb. 1). In einem teilautomatisierten Arbeitsablauf werden Messungen mit den einzelnen Sensoren sequentiell auf den Bohrkernproben durchgeführt. Mittels eines Drei-Achs-Portals werden die Sensoren in allen drei Raumrichtungen hochpräzise positioniert wodurch eine räumliche Zuordnung der Sensoren und somit auch eine Datenfusion ermöglicht wird. Auf den fusionierten Sensordaten werden anhand von machine learning (deep learning) Algorithmen Klassifizierungsmodelle errechnet, die die Bohrkernproben in projektspezifische Klassen unterteilen. Als typische Klassen können z. B. Lithologien, Alterationszonen oder bestimmte mineralogische oder geochemische Zusammensetzungen gelten. Die systematische Unterteilung der Klassen wird eingangs von Geologen gesteuert und dem System während eines überwachten Trainings angeleert. Das daraus bestimmte Interpretationsmodell klassifiziert anschließend die gemessenen/gescannten Bohrkern nahezu in Echtzeit. ANCORELOG ist die neueste Entwicklung in DMTs bewährter Produktlinie CoreScan.



Abb. 1 – DMT-ANCORELOG-System – Einsatz im Bohrkernlager des Geologischen Dienstes NRW

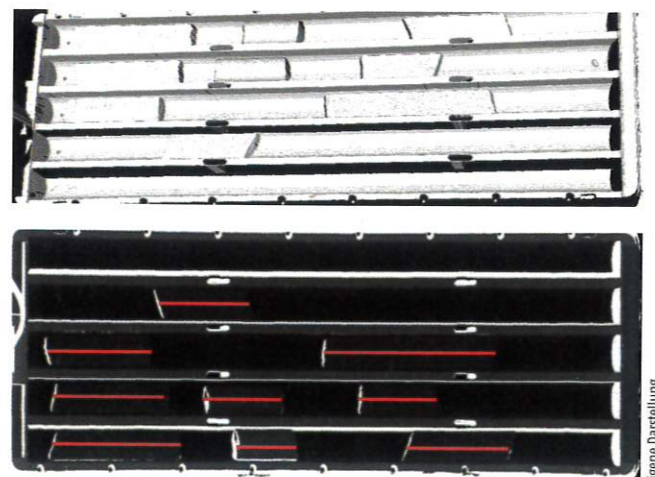


Abb. 2 – Oben: Graustufenbild der aus der Laserzeilenmessung resultierenden Punktwolke; unten: optimaler Messpfad der Sensoren (rote Linien)

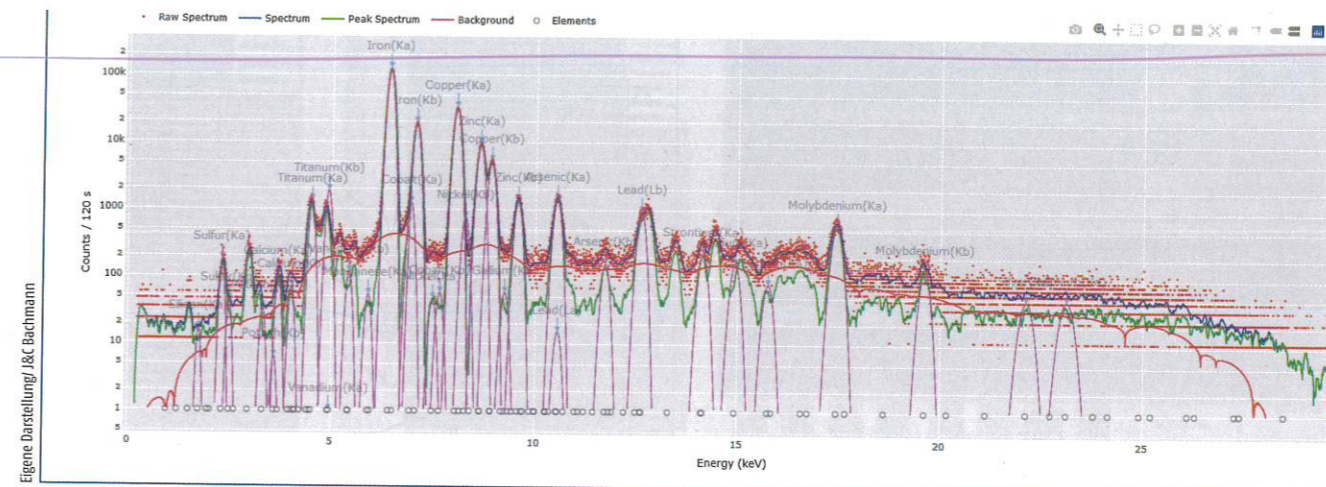


Abb. 3 – Emissionsspektrum der RFA-Messung

### Technik und Aufbau des Systems

ANCORELOG ist für die Bearbeitung von Bohrkernkisten mit einer maximalen Länge von 125 cm, einer maximalen Breite von 50 cm und einem maximalen Bohrkerndurchmesser von 15 cm ausgelegt. Mit den Maßen von BHT 260x175x150 cm wurde bei der Konstruktion auf eine bestmögliche Kompaktheit des Gerätes Wert gelegt, um einen Transport in entlegene Regionen zu gewährleisten. Durch einen teilautomatisierten Messablauf wird in Abhängigkeit der gewählten Sensorkombination und Messgenauigkeit eine Scanrate von 20 bis 60 m pro Stunde erreicht. Ein Laser-Zeilensensor tastet zunächst die Oberfläche der Bohrkern ab und ermittelt einen optimalen Messpfad für jeden der Sensoren (Abb. 2). Anschließend werden in einem automatisierten Verfahren die einzelnen Sensormessungen sequentiell durchgeführt.

### Sensoren

Durch einen modularen Aufbau kann ANCORELOG mit unterschiedlichen Sensorkombinationen ausgestattet werden. Die zur Auswahl stehenden Sensoren messen:

#### 1. Die chemische Gesteinszusammensetzung

Die chemische Gesteinszusammensetzung wird mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) oder Laser Induzierter Plasma Spektroskopie (LIBS) gemessen. Beide Sensoren können unabhängig voneinander oder in Kombination eingesetzt werden. Während die Stärke des RFA-Sensors vor allem in der Detektion schwerer Elemente (Ordnungszahl > 15) liegt, zeichnet sich der LIBS-Sensor durch eine gute Detektion leichter Elemente (Ordnungszahl < 15) wie beispielsweise auch des zunehmend an Interesse gewinnenden Elements Lithium aus. Mit der Kombination beider Sensoren wird ein breiteres Spektrum an chemischen Elementen abgedeckt.

Bei der RFA handelt es sich um eine zerstörungsfreie Analyse-methode, die charakteristische Röntgenemissionsspektren am Bohrkern misst, während er von einer primären Röntgenquelle angeregt wird. Die emittierten Spektren setzen sich aus Intensitätsspitzen in charakteristischen energetischen Kennlinien zusammen, aus denen die elementare Zusammensetzung des Bohrkerns bestimmt wird (Abb. 3). RFA-Handgeräte werden häufig in der Explorations- und Bergbauindustrie zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzung von Gesteinsproben eingesetzt. Diese weit verbreitete RFA-Technologie kommt im ANCORELOG System in Form einer kontinuierlichen Profilmessung entlang der

Bohrkerne zum Einsatz (Abb. 4). Variable Sensorbewegungsgeschwindigkeiten und Dauer der Einzelmessungen ermöglichen nahezu frei wählbare Messstreckenintervalle im Bereich zwischen 1 bis 100 cm, je nach gewünschter örtlicher Auflösung.

LIBS ist eine Multi-Element-Technologie, die in Instrumenten zur Untersuchung der Zusammensetzung von Gesteinen und Sedimenten eingesetzt wird. Die Technologie basiert auf der Atomemissionsspektroskopie, bei der die Anregung der Atomspezies auf der Probenoberfläche mit einem hochenergetischen Puls laser erfolgt (Abb. 5). Ähnlich wie der RFA-Sensor kann der LIBS-Sensor kontinuierliche Profile auf dem Bohrkern und zusätzlich auch noch detaillierte Auskartierungen von Elementverteilungen auf der Oberfläche der Bohrkern messen (Abb. 6).

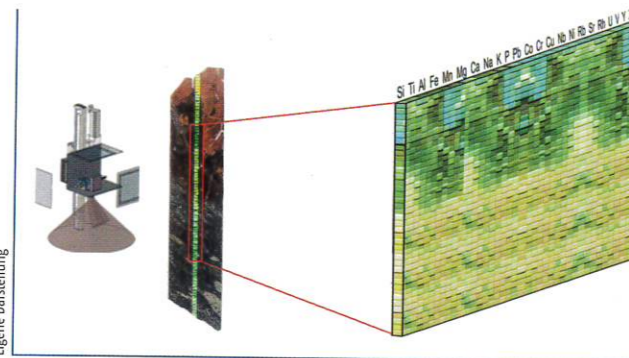


Abb. 4 – Schematische Darstellung des RFA-Messprofils

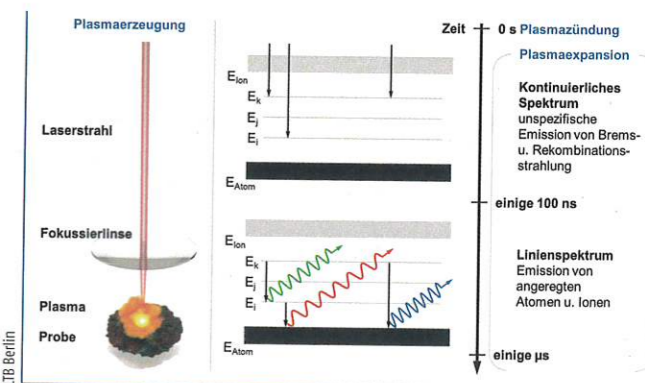


Abb. 5 – Plasmaerzeugung und daraus resultierende Atomemission



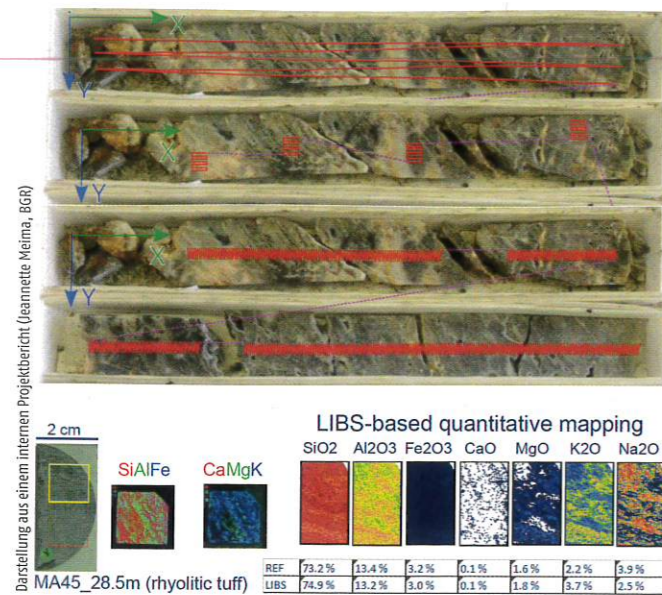


Abb. 6 – Oben: Darstellung verschiedener LIBS-Messmodi; unten: Auskartierung von Elementverteilungen

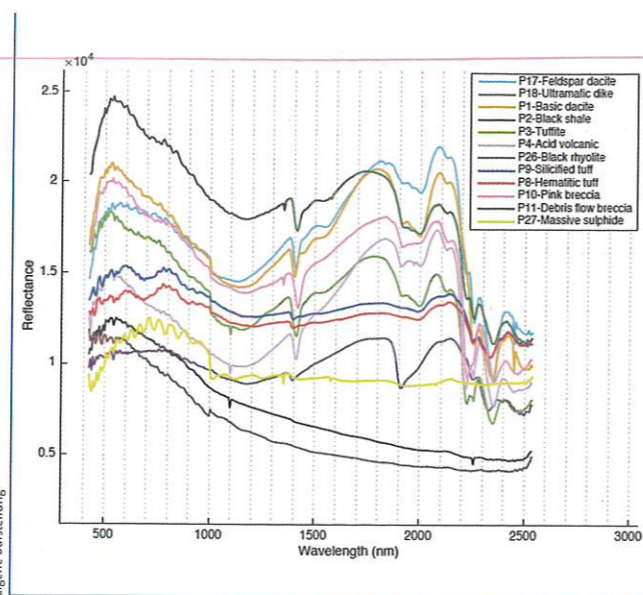


Abb. 7 – Absorptionsspektren unterschiedlicher Gesteine im sichtbaren bis kurzwelligen Infrarot-Spektrum

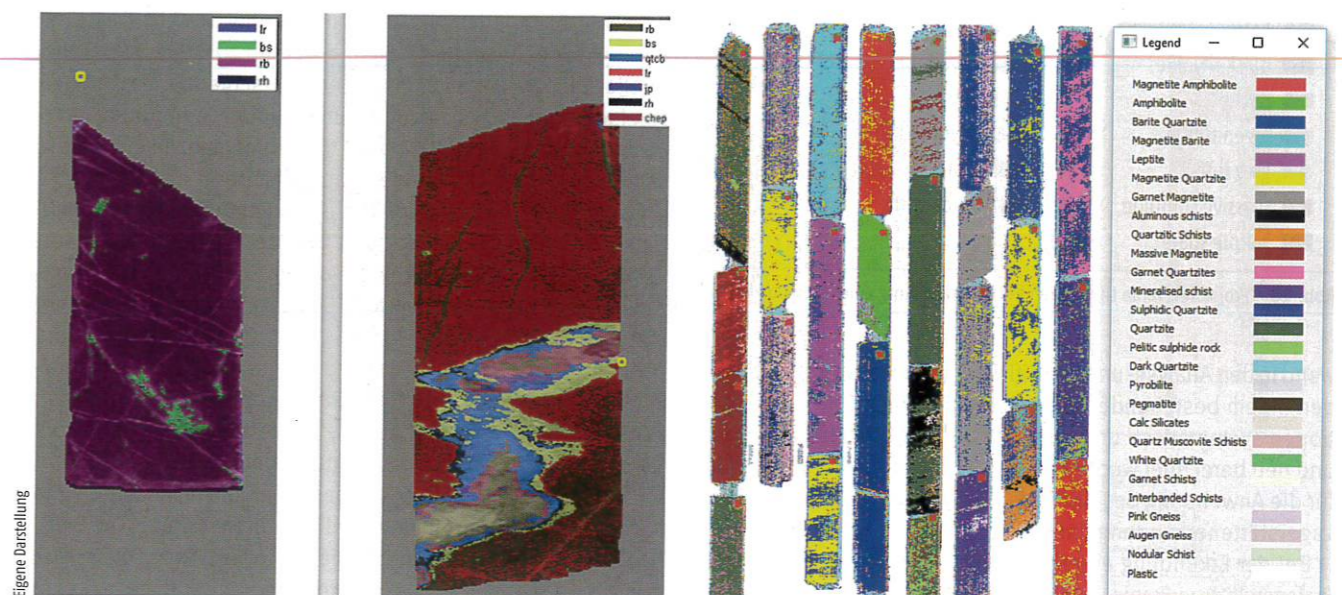


Abb. 9 – Falschfarbendarstellung lithologischer und mineralogischer Gesteinszusammensetzungen an Bohrkernen

## 2. Die mineralogische Gesteinszusammensetzung

Zur Bestimmung der mineralogischen Gesteinszusammensetzung kommen im ANCORELOG-System hyperspektrale Zeilenkameras (HSI) und ein Raman-Sensor zum Einsatz. Bedingt durch die Fähigkeit, in kurzer Zeit große Flächen erfassen zu können, kommt die HSI-Kamera durchgehend bei allen Bohrkernproben zum Einsatz. Ergänzend dazu können einzelne „Regions of Interest“ punktuell mit dem Raman-Sensor gescannt werden.

Hyperspektrale bildgebende Verfahren werden in der Geologie zur Unterscheidung bzw. Identifizierung verschiedener Minerale und Gesteine eingesetzt. Zwei Hauptmechanismen sind verantwortlich für die einzigartige spektrale Signatur jedes Minerals oder Gesteins: Elektronische Prozesse und molekulare bzw. atomare Schwingungen (Abb. 7).

Die Raman-Spektroskopie ist ein spektroskopisches Analyseverfahren, das Energieverschiebungen von Photonen erfasst, die von einer monochromatischen Anregungsquelle, in diesem Fall einem im Pikosekundenbereich gepulsten 532-nm-Laser, emittiert werden. Die Energieverschiebungen werden durch eine Wechselwirkung mit molekularen Schwingungen in der gemessenen Probe verursacht. Durch die Detektion der charakteristischen Energieverschiebungen von Molekülen wird die mineralogische Probenzusammensetzung bestimmt (Abb. 8).

## 3. Texturelle und strukturelle Gesteinseigenschaften

Trennflächen, mineralisierte Klüfte, Schichtungen und weitere Texturen und Strukturen werden mittels der hyperspektralen und hochauflösenden RGB-Zeilenkamera dokumentiert. Daraus

resultiert eine ortsgenaue, definierte Kombination aus mineralogischen, chemischen und textuellen Gesteinseigenschaften des Bohrkerns, die eine Einteilung in unterschiedliche, projektspezifische Klassen (z. B. Lithologien, Alterationszonen, bestimmte mineralogische oder geochemische Zusammensetzungen) ermöglicht.

## Klassifizierungsmodelle

Die von den verschiedenen Sensoren gemessenen Daten können durch die ortsgenaue Registrierung über ein definiertes, gemeinsames Datenformat zusammengeführt und gemeinsam analysiert und ausgewertet werden. Daraus resultiert eine ortsgenaue, definierte Kombination aus mineralogischen, chemischen und textuellen Gesteinseigenschaften des Bohrkerns (z. B. auf der Bohrkernoberfläche), die eine Einteilung der gemessenen Bohrkerns in unterschiedliche, projektspezifische Klassen (z. B. Lithologien, Alterationszonen, bestimmte mineralogische oder geochemische Zusammensetzungen) ermöglicht. Zur Erstellung des Klassifizierungsmodells werden verschiedene „Deep Learning“-Techniken angewendet. Zu Beginn werden projekt- oder lagerstättenspezifische Referenzproben mit den unterschiedlichen Sensoren gescannt und die Ergebnisse mit Referenzwerten aus Laboruntersuchungen abgeglichen. Geologen führen anschließend softwarebasiert eine systematische Einteilung in Klassen durch („Labelling of Classes“). Aus den Referenzmessungen und der systematischen Einteilung in Klassen resultiert ein Trainingsdatensatz aus dem ein Klassifizierungsmodell errechnet wird. Im Anschluss daran können mit dem ANCORELOG-System gescannte Bohrkerns unbekannter Beschaffenheit automatisiert in nahezu Echtzeit klassifiziert werden (Abb. 9).

## Anwendungsbeispiel

Eine teilautomatisierte, sensorgesteuerte Bohrkernaufnahme – in Kombination mit einem robusten Klassifizierungsmodell – bietet im Verlauf von geologischen Erkundungsprogrammen bedeutende Vorteile. Verschiedene Arbeitsschritte der geologischen Bohrkernaufnahme sind als repetitive Prozesse zu verstehen, die sich für ein hervorragendes Einsatzgebiet für eine

konsistente, automatisierte Datenaufnahme durch die analytische Sensorik des ANCORELOG-Systems anbieten. Echtzeitergebnisse können lange Standzeiten und damit verbundene Kosten und Qualitätsverluste reduzieren und die Produktivität signifikant steigern. Neue Erkenntnisse, die im Laufe des Erkundungsprogramms gewonnen werden, können ohne großen Auf-

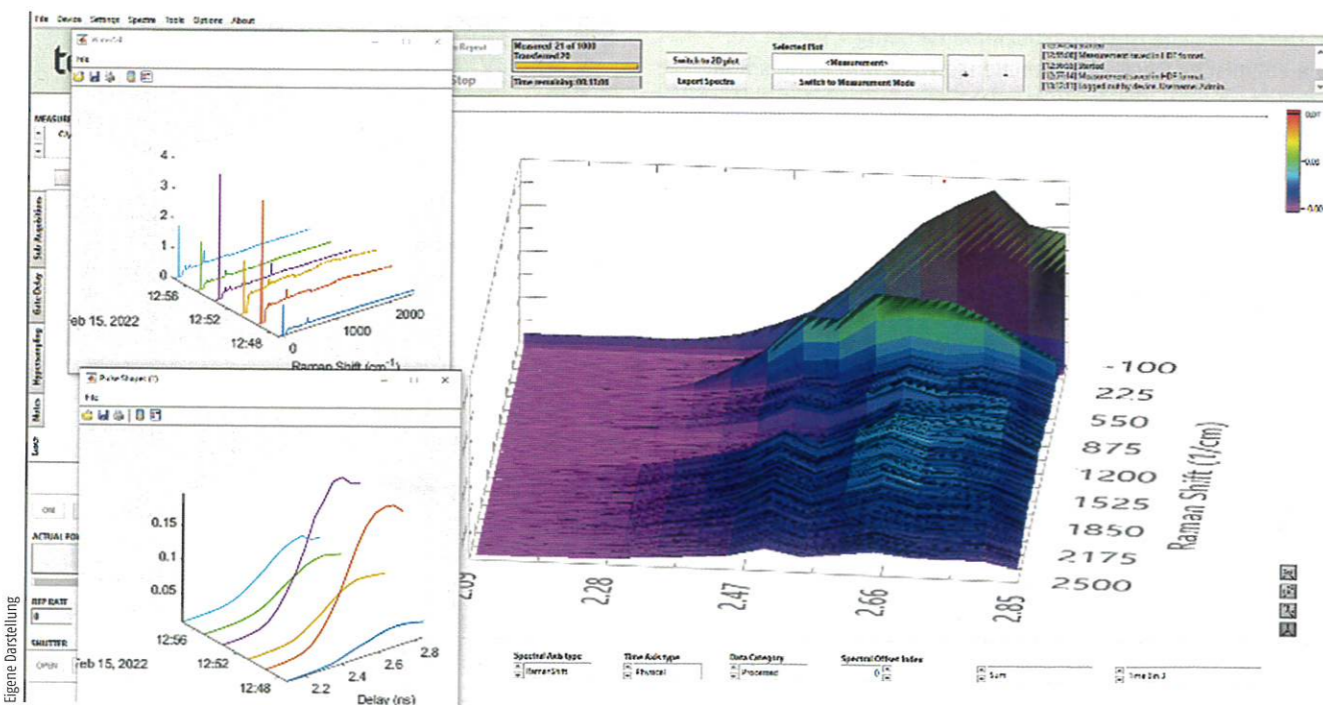


Abb. 8 – Graphische Darstellungen der Raman-Verschiebungen



**BAUER SPEZIALTIEFBAU**

Mit der Umsetzung anspruchsvollster Projekte setzt die BAUER Spezialtiefbau Gruppe weltweit Maßstäbe. Von der Planung bis zur Ausführung bieten wir individuelle, kreative und wirtschaftliche Spezialtiefbaulösungen für die Bauprojekte unserer Kunden.

BAUER Spezialtiefbau GmbH  
BAUER-SträÙe 1 • 86529 Schrobenhausen bst.bauer.de



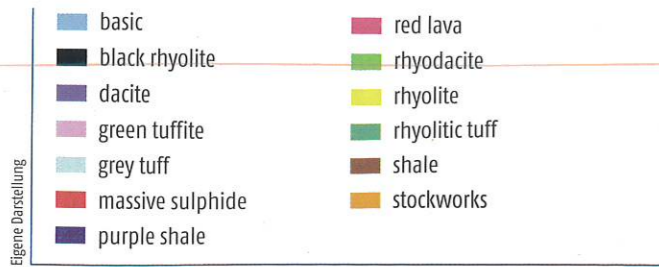


Abb. 10 – Projektrelevante Lithologien bei der Erkundung einer VMS-Lagerstätte

wand in den Analyse- und Klassifizierungsprozess integriert werden indem bestehende Datensätze oder sogar Fehlinterpretationen systematisch und automatisiert (in Echtzeit) korrigiert und neu berechnet werden. Im Folgenden wird ein Fallbeispiel für die Anwendung des ANCORELOG-Systems im Rahmen einer Lagerstätten erkundung dargestellt.

Bei der Erkundung einer massiven Sulfidvererzung in einer Erzlagerstätte vulkanischen Ursprungs wurden ca. 2.000 m Bohrkern aus vier Erkundungsbohrungen mit dem ANCORELOG-System gescannt und analysiert. Im Vorfeld der Messkampagne wurde anhand von Referenzproben eine Sensorkalibrierung durchgeführt und ein lithologisches Klassifizierungsmodell (Convolutional Neural Network) basierend auf HSI- und RFA-Messwerten berechnet. Vor Ort im Einsatzgebiet wurden die gemessenen Bohrkern mit den Geologen des Auftraggebers lithologisch klassifiziert und die chemischen Zielelemente (Fe, S, Cu, Pb, Zn) der Teufe nach dargestellt.

Die Sulfidvererzungen treten in einer vulkano-sedimentären Abfolge auf, die aus Gesteinen basaltischer, andesitischer, dazi-

tischer und rhyolotischer Zusammensetzung besteht. Gesteinsarten gleicher Zusammensetzung werden zusätzlich über textuelle Eigenschaften voneinander unterschieden. So wird beispielsweise zwischen Rhyoliten und rhyolitischen Tuffen unterschieden. In Abbildung 10 sind die projektspezifischen Klassen, in diesem Fall Lithologien, aufgelistet.

Für die Bestimmung der Lithologien wurden die hyperspektralen Bilder zusammen mit den RFA-Messwerten in Form von Zählimpulsen pro Sekunde normiert auf 120 Sekunden genutzt. Abbildung 11 zeigt ein digitales Schichtenverzeichnis, in dem die Verteilung der Zielelemente (S, Fe, Cu, Zn, Pb) sowie die basierend auf den Sensordaten erzeugte lithologische Klassifizierung in der Teufe neben den Bohrkernbildern dargestellt ist. Zur übersichtlicheren Darstellung wurde ein ca. 250 m langes Bohrprofil in der Teufe gestaucht dargestellt. Die oberen erbohrten Schichten (100 bis 245 m) bestehen im Wesentlichen aus der angesprochenen vulkano-sedimentären Abfolge. Die Blei-, Kupfer- und Zinkgehalte sind in diesen Formationen sehr gering und haben bezogen auf die lithologische Klassifizierung keine Bedeutung. In einer Teufe von 245 bis 320 m wurden massive Sulfidvererzungen angetroffen, was sich sehr gut an den steigenden Schwefel-, Eisen-, Blei-, Kupfer- und Zinkgehalten zeigt. Innerhalb der massiven Sulfidvererzung geben die Verhältnisse zwischen den Elementen Eisen, Kupfer, Zink und Blei Aufschluss über den Vererzungstyp. Im oberen Bereich der Vererzung (245 bis 250m) kommen relativ hohe Eisen-, Kupfer-, Zink- und Bleigehalte vor, was auf eine polymetallische Sulfidvererzung hindeutet. Darauf folgt von 250 bis 280 m ein Bereich mit hohen Eisen- und Kupfergehalten und geringen Zink- und Bleigehalten. Von 280 bis ca. 290 m Teufe kommen hohe Zink- und Blei-

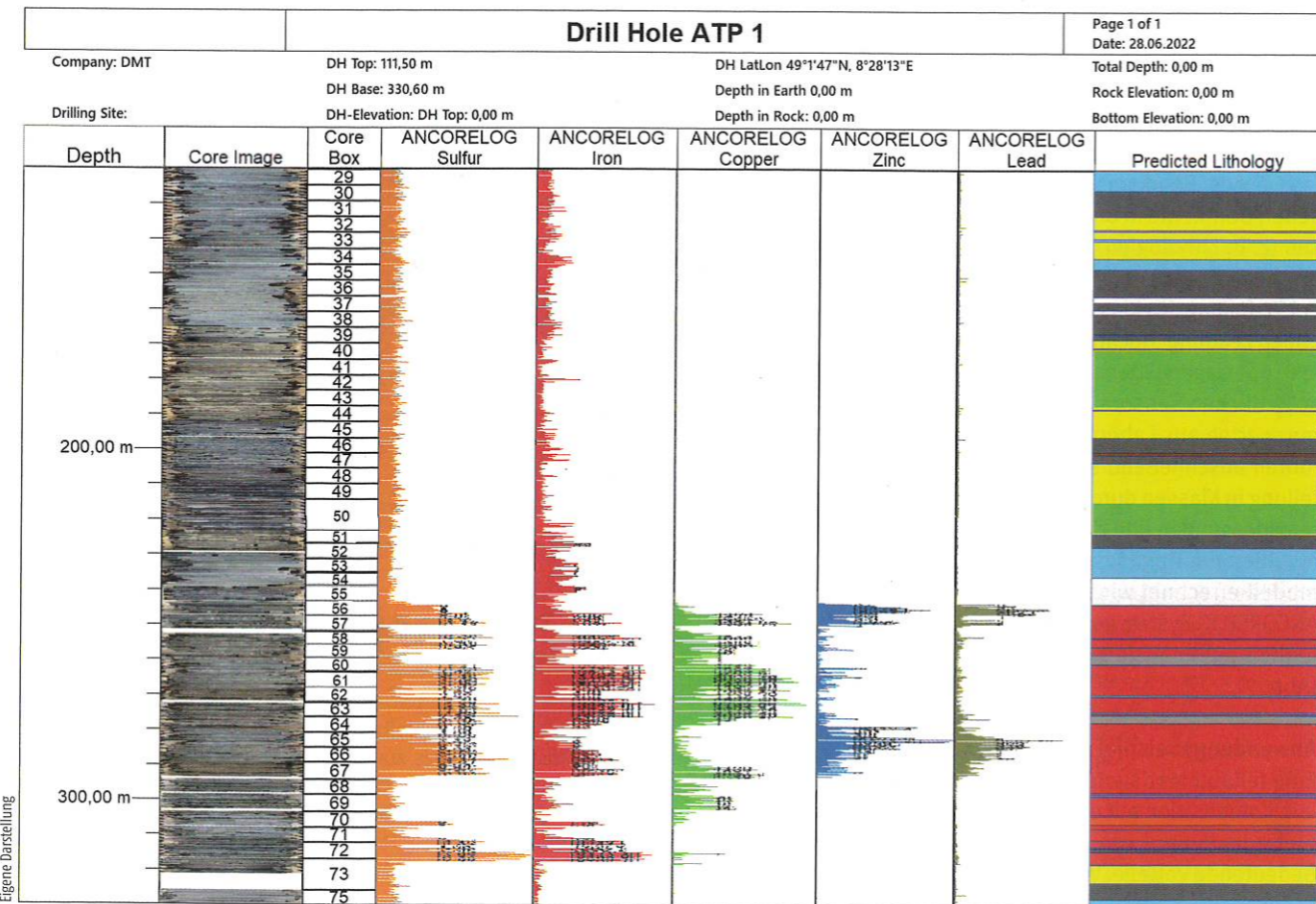


Abb. 11 – Digitales Bohrprofil mit der Darstellung lithologischer und geochemischer Eigenschaften entlang der Teufe

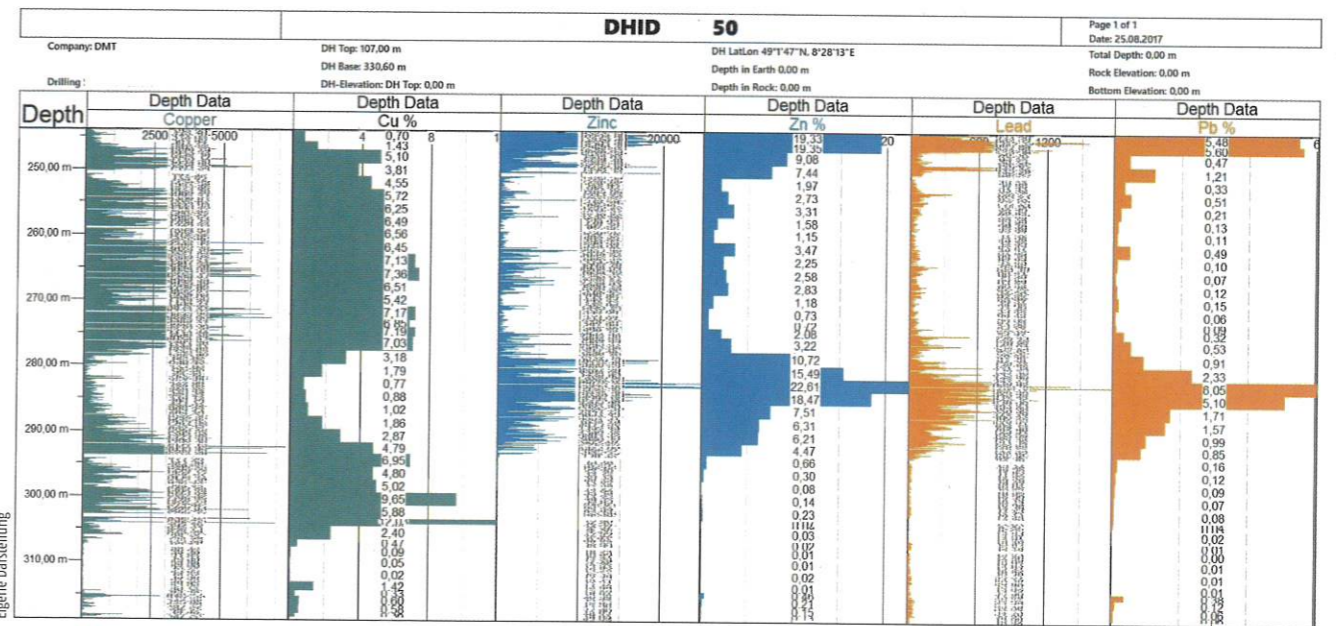
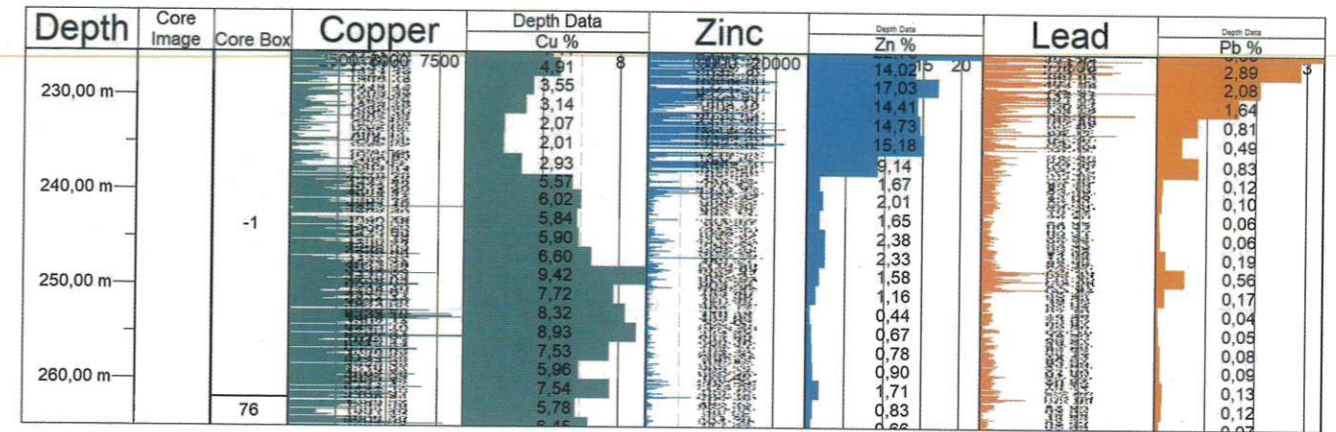


Abb. 12 – Gegenüberstellung von ANCORELOG-RFA-Ergebnissen (jeweils linke Spalte) und der Laboranalytik (jeweils rechte Spalte)

gehalte vor bei gleichzeitig geringeren Kupfer- und Eisengehalten, gefolgt von hohen Kupfergehalten im Bereich 290 bis ca. 310 m und abschließend bei 310 bis 320 m hohen Anteilen an Eisen und geringen Kupfer-, Zink- und Bleigehalten. Diese Informationen sind für den Abbauprozess sowie für die spätere Erzsottierung und -aufbereitung von hohem Interesse.

Abbildung 12 zeigt eine der Teufe nach aufgetragene Gegenüberstellung der ANCORELOG-RFA-Messergebnisse und der Laborergebnisse. Die feiner aufgelösten Balken in den jeweils linken Spalten stellen ANCORELOGs kontinuierliche RFA-Ergebnisse dar, die größer aufgelösten Balken in den jeweils rechts angeordneten Spalten sind die zugehörigen Laborergebnisse. Darin ist deutlich zu erkennen, wie präzise die Laborergebnisse durch die RFA-Messungen reproduziert werden.

**Schlussfolgerung**

ANCORELOG bietet die Möglichkeit, mit präzisen, konsistenten und wiederholbaren Ergebnissen in nahezu Echtzeit zu einer raschen Entscheidungsfindung beizutragen und mögliche Standzeiten zu vermeiden, insbesondere wenn man als Alternative den hohen Arbeits-, Zeit- und Kostenaufwand betrachtet, der mit der Beprobung, dem Versand und der Laboranalytik einhergeht.

Die Konsistenz und Wiederholbarkeit der Daten ermöglichen eine deutliche Verbesserung geologischer Lagerstättenmodelle

und liefern frühzeitig nützliche Informationen für den späteren Abbau und die Erzanreicherung, wodurch sich die Planungssicherheit erhöht. Eine lückenlose Digitalisierung, Dokumentation und Analytik der Bohrkern erleichtert zudem den Datenaustausch, unabhängig vom Lagerort der physikalischen Bohrkernproben. ANCORELOG ist als Werkzeug für Geologen zu verstehen. Die von Geologen ausgeführte Einteilung der projektspezifischen Klassen sowie die überwachte Trainingsphase des Systems erhöhen die Transparenz und vermeiden den Effekt einer „Black Box“, bei der die Herleitung der Ergebnisse nicht nachvollzogen werden kann.

**Autoren**

Carlos Garcia Pina  
Christian Kaminski  
Dr. Boris Dombrowski  
DMT GmbH & Co. KG  
Am TÜV 1  
45307 Essen  
Tel.: +49 (0) 201 172 01  
info@dm-group.com  
www.dmt-group.com/de