

Projekt Gorleben

9GE332300000

Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben



Ergebnisbericht 2012

Hannover, April 2013

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Projekt Gorleben

Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk
Gorleben

Ergebnisbericht 2012

Autoren:	Hammer, Jörg, Dr.; Pusch, Maximilian; Häger, Andreas, Dr.; Scheeder, Georg; Shao, Hua, Dr.; Paul, Benjamin; Ostertag-Henning, Christian, Dr.; Mingerzahn, Gerhard; Schlömer, Stefan, Dr.; Hesser, Jürgen, Dr.
Auftraggeber:	Bundesamt für Strahlenschutz
Auftragsnummer:	9GE332300000
Geschäftszeichen:	B3.4/B50123-10/2013-0001/001
Datum:	30.04.2013
TK-Nummer:	2934 Lenzen

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

Direktor und Professor Dr. V. Bräuer (Abteilungsleiter B3), Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	6
1 Einleitung.....	7
2 Ziele der Untersuchungen und Untersuchungsprogramm.....	8
2.1 Ziele der Untersuchungen.....	8
2.2 Untersuchungsprogramm.....	10
3 Makroskopisch sichtbare Verteilung der Kohlenwasserstoffe im Ostteil des Erkundungsbereiches 1.....	12
3.1 Verteilung der Kohlenwasserstoffe in den Probenahme- und Packer- bohrungen im Querschlag 1 Ost.....	12
3.2 Schlussfolgerungen aus der Kohlenwasserrstoffverteilung in den Bohrkernen.....	20
4 Petrographisch-mikrostrukturelle Untersuchungen zur Klärung der Verteilung und Genese der Kohlenwasserstoffe.....	25
4.1 Petrographische Beschreibung der Proben und Verteilung der Kohlen- wasserstoffe im Dünnschliff.....	25
4.2 Schlussfolgerungen aus der Analyse der Kohlenwasserstoff-verteilung in den Dünnschliffen.....	31
4.3 Mikrostrukturelle Studien der Deformationsgefüge von Hauptsalzproben.....	34
4.3.1 Subkorngefüge und Paläopiezometrie.....	35
4.3.1.1 Grundlagen der Subkornpiezometrie.....	35
4.3.1.2 Beschreibung der Subkorngefüge.....	37
4.3.1.3 Ergebnisse der paläopiezometrischen Analysen.....	40
4.3.1.4 Diskussion.....	42
4.3.2 Untersuchungen von Knäuelsalz- und Streifensalzproben mittels electron backscatter diffraction.....	43
4.3.2.1 Grundlagen und Prinzip von EBSD-Messungen an Salzgesteinen.....	43
4.3.2.2 Probenpräparation.....	44
4.3.2.3 Analysenverfahren und Visualisierung der Untersuchungsergebnisse.....	45
4.3.2.4 Ergebnisse der EBSD-Analysen.....	45
4.3.2.5 Diskussion.....	51
4.3.3 Computertomographische Untersuchungen von Knäuelsalzproben.....	52
4.3.3.1 Probenvorbereitung und Mess- bzw. Auswerteverfahren.....	53
4.3.3.2 CT-Aufnahmen und Datenverarbeitung.....	54
4.3.3.3 Ergebnisse: Analyse des Porenraumes auf der Grundlage der CT-Roh- daten.....	56
4.3.3.4 Ergebnisse: 3D-Rekonstruktionen der CT-Datensätze.....	57

	Seite
4.3.3.5	Ergebnisse: Quantifizierung des Porenraumes..... 61
4.3.3.6	Ergebnisdiskussion: Probleme bei der dreidimensionalen Visualisierung des Porenraumes..... 62
4.3.3.7	Ergebnisdiskussion: Porositätswerte und Porenraumverteilungen..... 64
4.3.4	Ergänzende Untersuchungen an mikroporösen Knäuelsalzproben mittels Lichtmikroskop..... 66
4.3.4.1	Untersuchungsergebnisse..... 66
4.3.4.2	Bewertung der Probenimprägnation..... 69
4.3.5	Schlussfolgerungen aus den mikrostrukturellen Untersuchungen..... 70
5	Untersuchungen zur Verteilung der Kohlenwasserstoffe mittels Confocal Laser Scanning Microscopy 73
5.1	Ergebnisse der mikrostrukturellen Untersuchungen mittels CLSM..... 74
5.2	Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen von Kohlenwasserstoff- haltigen Hauptsalzproben mittels CLSM..... 79
6	Gehalte, Zusammensetzung und Genese der Kohlenwasserstoffe im Hauptsalz des Querschlag 1 Ost..... 79
6.1	Kontaminationen der Bohrkernoberfläche im Querschlag 1 Ost..... 79
6.1.1	Vor Beginn der Bohrarbeiten ergriffene Maßnahmen zur Qualitätssicherung..... 79
6.1.2	Befunde der Bohrungskampagne im Querschlag 1 Ost im Herbst 2011..... 80
6.1.3	Eingrenzung der Kontaminationsquelle..... 82
6.1.4	Maßnahmen zur Beseitigung der Kontaminationsquelle..... 83
6.1.5	Zusätzliche qualitätssichernde Maßnahmen während der Bohrkampagne im Frühjahr 2012..... 83
6.2	Methodenanpassungen im Vergleich zu den Arbeiten in 2011..... 84
6.2.1	Analyse der flüchtigen Kohlenwasserstoffe Methan bis Hexan..... 84
6.2.2	Analyse der niedrig siedenden Kohlenwasserstoffe von Heptan bis Decan..... 85
6.2.3	Analyse der höher siedenden Kohlenwasserstoffe zwischen Decan und Tetracontan..... 86
6.3	Überblick zu den Bohrungslokalationen im Querschlag 1 Ost..... 86
6.4	Ergebnisse der organochemischen Untersuchungen der Probenahme- Kurzbohrungen im Querschlag 1 Ost..... 88
7	Untersuchungen zur Kohlenwasserstoff-Führung des Kristallbrocken- salzes (z2HS3) in Bohrort 5.0..... 92
7.1	Verteilung der Kohlenwasserstoffe in den Aufschlüssen des Bohrortes 5.0..... 92
7.2	Organogeochemische Untersuchungen an Proben aus dem Bohr- ort 5.0..... 96

Seite

7.2.1	Sequentielle Extraktion der Kohlenwasserstoff-Phasen an Proben aus dem Profil 2A.....	96
7.2.2	Bestimmung der Kohlenwasserstoff-Gehalte von C ₁ bis n-C ₄₀ an einzelnen Gesteinsproben aus dem Bohrort 5.0.....	104
8	Untersuchungen der akzessorischen Minerale in den Kohlenwasserstoff-führenden Hauptsalzproben aus dem Querschlag 1 West mittels Raster-elektronenmikroskop.....	106
8.1	Ergebnisse der Untersuchungen mittels ESEM.....	106
8.2	Schlussfolgerungen aus den rasterelektronenmikroskopischen Unter-suchungen.....	113
9	Packerbohrungen zur In-situ-Quantifizierung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen.....	113
9.1	Zielsetzung der Druckaufbaumessungen in den Packerbohrungen.....	113
9.2	Installation der Packerbohrungen im Jahr 2012 und erste Befunde.....	114
9.2.1	Bohrort 1.2 (RB694).....	116
9.2.2	Querschlag 1 Ost (RB693 und RB695 bis RB700).....	117
9.2.3	Bohrort 5.0 (RB701 und RB702).....	118
9.3	Klassifizierung der Packerbohrungen anhand der Druckaufbaumessungen.....	119
9.4	Bestimmung des Gasvolumens und des Einflussbereiches der Druckent-lastung im Gebirge.....	121
9.4.1	Auswerteverfahren zur Gasvolumenbestimmung.....	121
9.4.2	Abschätzung des durch die Packerbohrungen hervorgerufenen Einfluss-bereiches der Druckentlastung.....	124
9.5	Quantifizierung der Kohlenwasserstoff-Zutrittsraten.....	127
9.6	Isoliertheit/Konnektivität der Kohlenwasserstoff-Vorkommen.....	128
9.7	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.....	130
10	Mikroskopische Untersuchungen zum Verhalten von Fluidphasen im Knäuelsalz bei Aufheizung unter Normaldruck.....	131
10.1	Einfluss von Temperatur und Deformation auf die Fluidverteilungen in Salzgesteinen.....	131
10.2	Probenpräparation und Untersuchungsmethodik.....	133
10.2.1	Probenpräparation.....	133
10.2.2	Grundlagen und Durchführung der Heiz-Kühltisch-Experimente.....	133
10.3	Untersuchungsergebnisse.....	134
10.4	Diskussion der mikroskopischen Beobachtungen.....	139
10.5	Schlussfolgerungen.....	141

Seite

11	Zusammenfassung.....	142
	Literaturverzeichnis.....	146
	Abkürzungsverzeichnis.....	151
	Tabellenverzeichnis.....	157
	Abbildungsverzeichnis.....	158
	Anhangverzeichnis.....	171

Gesamtblattzahl: 207

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Hammer, Jörg, Dr.; Pusch, Maximilian; Häger, Andreas, Dr.; Scheeder, Georg; Shao, Hua, Dr.; Paul, Benjamin; Ostertag- Henning, Christian, Dr.; Mingerzahn, Gerhard; Schlömer, Stefan, Dr.; Hesser, Jürgen, Dr.
Titel:	Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben
Schlagwörter:	Endlagerung, Erkundung, Fluide, Gorleben, Hauptsalz, Kohlenwasserstoffe, Porenraum, Salzgeologie

In diesem Zwischenbericht werden die im Jahr 2012 erzielten Untersuchungsergebnisse zur Kohlenwasserstoffführung des Staßfurt-Hauptsalzes im Erkundungsbergwerk Gorleben dargestellt. Neben der Ermittlung der Gehalte, der Zusammensetzung und der räumlichen Verteilung der Kohlenwasserstoffe im Hauptsalz des Querschlages 1 Ost bilden petrographisch-mikrostrukturelle Analysen sowie Untersuchungen zur In-situ-Quantifizierung der Volumina der Kohlenwasserstoffvorkommen die Schwerpunkte der Arbeiten. Außerdem erfolgten Studien zum Einfluss erhöhter Temperaturen auf die mikroskopisch erfassbare Kohlenwasserstoffverteilung im Salzgestein. Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein breites Spektrum von Methoden eingesetzt, wie z. B. polarisations- und fluoreszenzmikroskopische Analysen von Dünn- und Dickschliffen, organo-geochemische und computertomographische Studien, EBSD-Messungen, Subkornanalysen, Rasterelektronenmikroskopie sowie Heiz-Kühltisch-Experimente. Mit Hilfe der Computertomographie und mikroskopischen Untersuchungen wurde die räumliche Verteilung der Fluide im Staßfurt-Hauptsalz visualisiert. Die Kohlenwasserstoffe sind überwiegend an die Korngrenzen von Steinsalz- und Anhydritkristallen in rekristallisierten Hauptsalzbereichen gebunden. Es deuten sich Unterschiede im Gefüge zwischen kohlenwasserstoffführenden und kohlenwasserstofffreien Hauptsalzproben an. Die Kohlenwasserstoffgehalte für die Hauptsalzproben aus dem Querschlag 1 Ost variieren zwischen den Bohrungen sowie in den Bohrungen selbst sehr stark und reichen von 0,01 mg/kg bis 121 mg/kg Salzgestein. Kohlenwasserstoffkonzentrationen von mehr als 10 mg/kg Gestein wurden lediglich in zwei Proben aus einer der 20 Probenahme-Bohrungen im Querschlag 1 Ost nachgewiesen. Die molekulare Zusammensetzung und die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der in den Proben enthaltenen Kohlenwasserstoffe bestätigen die Ergebnisse aus früheren Arbeiten der BGR. Die unter Normaldruck und bei Temperaturen bis 250°C durchgeführten Heiz-Kühltisch-Experimente erbrachten Hinweise auf nur gering dimensionierte, temperaturinduzierte Mobilisierungen von Kohlenwasserstoffen im Bereich von halitischen Korngrenzen und Spaltrissen im Anhydrit. Die in diesem Bericht dargelegten Untersuchungsergebnisse repräsentieren einen Zwischenstand der Arbeiten.

1 Einleitung

Kohlenwasserstoffe (KW) sind in den meisten sedimentären und parametamorphen Gesteinen der Erdkruste enthalten und sind Teil des natürlichen Stoffbestands von Salzformationen. Sie bilden sich aus abgestorbenen Organismen (Biomasse), die im Zuge der Sedimentation in die Gesteine eingeschlossen, durch nachfolgende Sedimente überdeckt und im Verlaufe der Versenkung durch Temperaturerhöhung teilweise zu flüssigen und/oder gasförmigen KW umgewandelt wurden. Eine derartige (autochthone) Bildung von KW erfolgt in salinaren Sedimenten, wenn organisches Ausgangsmaterial zusammen mit den aus dem Meerwasser durch Überschreitung der entsprechenden Löslichkeitsprodukte ausgeschiedenen Evaporitmineralen abgelagert wird. Autochthone KW-Bildungen sind in sehr geringen Konzentrationen (i. d. R. im ppb-Bereich, siehe GERLING et al. 1991) in allen Salzgesteinen enthalten, leicht erhöhte autochthone KW-Konzentrationen wurden in den Kaliflözen der mitteleuropäischen Zechstein-Salzlagerstätten nachgewiesen.

Ergänzend zu dieser primären, quantitativ meist sehr geringen KW-Führung von Salzgesteinen werden in den meisten Salzformationen KW detektiert, die unter geeigneten Voraussetzungen aus dem liegenden karbonatisch-tonigen Teil der Salzablagerungen oder aus dem Nebengebirge in den halitischen oder Anhydrit-dominierten Teil der Salzstruktur hinein gelangen konnten. Im Verlaufe der erdgeschichtlichen Entwicklung kann durch fortschreitende Sedimentüberdeckung oder regionalgeologische bzw.-tektonische Prozesse eine Absenkung der Salinargesteine erfolgen, d. h. sie werden erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen ausgesetzt. Die dabei aus organischer Substanz gebildeten flüssigen und gasförmigen KW haben aufgrund ihrer im Vergleich zu Wasser geringeren Dichte das Bestreben, in höher gelegene Schichten der Erdkruste aufzusteigen. Eine Migration der KW in die undurchlässigen Steinsalzschieften ist dabei nur dann in größerem Umfang möglich, wenn in den Steinsalzschieften im Zuge tektonischer Beanspruchung räumlich und zeitlich begrenzt Wegsamkeiten in Form von Rissen bzw. Klüften entstehen, und wenn die hydraulischen Drücke in den an eine Salzstruktur angrenzenden KW-führenden Gesteinen Größenordnungen in Richtung des petrostatischen Teufendrucks erreichen. Unter diesen Bedingungen dringen die KW z. B. aus den liegenden karbonatisch-tonigen Partien der Salinarformationen in höher gelegene Bereiche der Salzstrukturen vor und werden im Zuge des Salzkriechens bzw. des Verheilens der gestörten Bereiche in die Salzgesteine eingeschlossen. Durch an den Salzaufstieg gebundene Materialverlagerungen werden die KW innerhalb der Salzstrukturen weiter umgelagert. Die Verteilung von KW innerhalb einer Salzlagerstätte gehorcht demzufolge lithologischen und v. a. strukturgeologischen, mit der individuellen Genese und dem Aufbau der jeweiligen Salzstruktur zusammenhängenden Gesetzmäßigkeiten.

In Fortführung der 2011 im Erkundungsbergwerk Gorleben im westlichen Teil der 840 m-Sohle im Querschlag 1 West (Q1W) durchgeführten Arbeiten zur Untersuchung

der Verteilung, Gehalte und Zusammensetzung der KW (HAMMER et al. 2012) wurden ab November 2011 KW-Probenahmebohrungen im Querschlag 1 Ost (Q1E) durchgeführt. Die Bohransatzpunkte wurden in Analogie zu den Arbeiten im Q1W als statistisches Raster mit (soweit aufgrund vorhandener untertägiger Ausbauten möglich) gleichem Abstand zueinander gewählt. Die im Jahr 2011 entwickelten Methoden zur Bestimmung der KW-Gehalte und -Zusammensetzungen wurden auch im Q1E eingesetzt, teils mit geringfügigen methodischen Anpassungen (vgl. Kap. 6.2).

Im Verlauf der Bohrkampagne im November/Dezember 2011 stellte sich heraus, dass es, anders als bei den Arbeiten im Q1W, durch den Bohrvorgang zu erheblichen Kontaminationen der Bohrkern mit höher siedenden KW gekommen ist. Im Ergebnis aufwändiger Untersuchungen wurden die Quellen der Kontaminationen identifiziert, Maßnahmen zur deren Behebung ergriffen und eine neue Methode als Schnelltest der Bohrkern auf oberflächige Kontaminationen als zusätzliche Qualitätssicherungsmaßnahme entwickelt (vgl. Kap. 6.1).

Der Nachweis von Kontaminationen an den Kernabschnitten von 4,5 m bis 6,0 m erforderte die Gewinnung von neuem, nicht kontaminierten Probenmaterial. Dies geschah durch Verlängerung der bis dahin durchgeführten Bohrungen im Q1E um weitere 3 m, wobei die Kernabschnitte von 7,5 m bis 9,0 m für die organochemischen Untersuchungen beprobt wurden. Diese zweite Bohrkampagne im Februar/März 2012 verlief erfolgreich, d. h. ohne Kontaminationsbefunde oberhalb der Bestimmungsgrenze. Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Proben aus den nicht kontaminierten Kernabschnitten (7,5 m - 9,0 m) des Q1E sind in Kap. 6.4 dargestellt. Zusätzlich sind die Ergebnisse der gasförmigen bzw. niedrig siedenden KW aus dem Kernbereich 4,5 m - 6,0 m abgebildet, da diese nicht durch die Kontamination mit höher siedenden KW beeinflusst wurden.

2 Ziele der Untersuchungen und Untersuchungsprogramm

2.1 Ziele der Untersuchungen

Die Untersuchungen zu den Gehalten und zur Verteilung der KW-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben sowie zu den Eigenschaften KW-führender Gesteinspartien wurden im Jahr 2000 durch das Erkundungsmoratorium unterbrochen. Die von der BGR in Abstimmung mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) bereits 1995 erarbeiteten umfangreichen Untersuchungsprogramme zur Analyse der KW-Vorkommen konnten mit der Unterbrechung der Erkundungsarbeiten (im Jahr 2000) nicht mehr umgesetzt werden. Die bis zum Jahr 2000 erzielten Untersuchungsergebnisse zur KW-Führung der Gesteine des Salzstockes Gorleben wurden ausführlich in zahlreichen Berichten und Publikationen

wie z. B. in GERLING & FABER (2001) und GERLING et al. (2002) dargestellt. Die während des Auffahrens des Erkundungsbergwerkes Gorleben sowie in den Erkundungsbohrungen festgestellten freien Gas- und Kondensatzutritte wurden im „Lösungskataster Gorleben“ (BfS 2002) dokumentiert und z. B. in den genannten BGR-Berichten ausgewertet.

Die Untersuchungen der KW-Vorkommen stellten einen Schwerpunkt der von November 2010 bis November 2012 erfolgten geologisch-geotechnischen Weitererkundung des Salzstocks Gorleben dar. Zur Klärung möglicher langzeitsicherheitlicher Auswirkungen der gasförmigen und flüssigen KW im Salzstock Gorleben auf ein mögliches Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle wurden seit März 2011 umfangreiche In-situ- und Laboruntersuchungen mit folgenden Hauptzielstellungen durchgeführt:

- Untersuchungen zur Klärung der räumlichen Verteilung, der Gehalte und der Zusammensetzungen der flüssigen und gasförmigen KW in den Gesteinen des Staßfurt-Hauptsalzes im Erkundungsbergwerk Gorleben,
- Gefüge- und Mikrostrukturanalyse der Salinargesteine zur Klärung der Bindungsformen, Genese und Verteilungsgesetzmäßigkeiten der KW im Staßfurt-Hauptsalz,
- Bestimmung der Herkunft und Genese der KW im Staßfurt-Hauptsalz anhand der molekularen Zusammensetzung der KW und isotopengeochemischer Parameter,
- Analyse der Auswirkungen von erhöhten KW-Gehalten auf die geomechanischen Eigenschaften des Staßfurt-Hauptsalzes,
- Untersuchungen zu Vorkommen, Verbreitung und Ausbildung von KW-Migrationswegen im Bereich von Auflockerungszonen um bergmännische Hohlräume und Bohrungen sowie zu den daran gebundenen KW-Migrationsprozessen und von durch Migration bedingten KW-Fraktionierungen; Abschätzungen von KW-Zutrittsraten ins Grubengebäude,
- Analyse des Verhaltens der flüssigen und gasförmigen KW während einer Aufheizung des Wirtsgesteins.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen wird im Abschlussbericht des Arbeitspaketes „Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben“ (Arbeitspaket: 9GE332300000) eine vorläufige Bewertung der KW-Vorkommen im Hinblick auf ihre sicherheitstechnische Bedeutung für die Eignung des Staßfurt-Hauptsalzes als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle sowie ggf. die Erarbeitung der Grundlagen für die Festlegung von Sicherheitsabständen zu langzeitsicherheitsrelevanten KW-Vorkommen erfolgen.

Die im Jahr 2010 durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in Auftrag gegebene „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) konnte aufgrund der noch nicht abgeschlossenen untertägigen geologischen Erkundung des Salzstocks Gorleben hinsichtlich der KW-Führung der Salinargesteine nur von vorläufigen Untersuchungsergebnissen und Annahmen ausgehen (WEBER et al. 2011).

2.2 Untersuchungsprogramm

Für das Erreichen der in Kap. 2.1 genannten Zielstellungen werden seit März 2011 thematisch breit gefächerte In-situ- und Labor-Untersuchungen durchgeführt. Die einzelnen Erkundungsmaßnahmen und Untersuchungsschwerpunkte wurden detailliert in HAMMER et al. (2012) erläutert und sind nachfolgend kurz aufgelistet, ergänzt durch wenige, für die Einordnung der 2012 durchgeführten Arbeiten besonders wichtige Aspekte:

a) Untersuchungen zu Vorkommen, Zusammensetzung und räumlicher Verteilung der flüssigen und gasförmigen KW durch eine für das Staßfurt-Hauptsalz statistisch abgesicherten, methodisch im Vergleich zu früheren Untersuchungen (siehe z. B. GERLING & FABER 2001, GERLING et al. 2002) geänderten Beprobung und KW-Analyse der Gesteinsproben.

Zusätzlich zu den jeweils 6,0 m bzw. 9,0 m kurzen Probenahmebohrungen (Bohrdurchmesser 88 mm) wurden leicht ansteigende 6 m-Bohrungen (Bohrdurchmesser 46 mm) gestoßen, in denen Packersysteme installiert wurden. In den mittels Packern abgetrennten Messintervallen wurden die Druckverhältnisse registriert und die in den Bereich der Druckentlastung zuströmenden Gase und Kondensate erfasst und regelmäßig beprobt.

In Abänderung der bis zum Jahr 2000 realisierten Arbeiten erfolgte eine sofortige Beprobung der Bohrkerne aus den Kurzbohrungen sowie die molekulare Charakterisierung und Quantifizierung der KW in den Kernproben bzw. in den Gas- und Kondensatzutritten über einen großen Siedebereich. Im Labor wurden für alle unmittelbar aus den Salzgesteinen entnommenen Proben die gasförmigen und höher siedenden KW von C₁ bis C₃₅ mit zur Qualitätskontrolle überlappend aufgestellten gaschromatographischen Analyseverfahren und gasförmige Nicht-KW-Gase quantifiziert, sofern die Konzentrationen hoch genug waren).

An einer repräsentativen Auswahl der Proben werden die Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse von Methan, Ethan und Propan sowie von CO₂ bestimmt; ausreichende Konzentrationen vorausgesetzt. Für flüssige KW werden für ausgewählte Proben die Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse der stabilisierten Gesamt-KW bestimmt. Außerdem wurden aus 20 Proben monomineralische Fraktionen der in den Gesteinen vorhandenen Sulfide, Karbonate und Anhydrite präpariert und hinsichtlich der Isotopenverhältnisse von Sulfidschwefel,

Sulfatschwefel, Kohlenstoff und Sauerstoff untersucht. Auf der Grundlage dieser Daten erfolgen Aussagen zur Genese der KW und der Salinargesteine.

b) mineralogisch-geochemische sowie gefügekundlich-mikrostrukturelle Untersuchungen zur Analyse der Verteilungsgesetzmäßigkeiten sowie zur Identifizierung und Dokumentation der Bindungs- bzw. Einschlussformen der KW im Salzgestein.

In Ergänzung zu den in HAMMER et al. (2012) durchgeführten Untersuchungen wurde durch Subkornanalysen und mittels electron backscatter diffraction (EBSD) analysiert, ob erhöhte KW-Konzentrationen an Bereiche mit erhöhten bzw. erniedrigten Strain- bzw. Deformationsraten gebunden sind und ob Gesteinsanisotropien Einfluss auf die KW-Verteilung haben. Außerdem wurde eine quantitative Beschreibung der Verteilung und Ausbildung der Poren im Gestein (Geometrie, Verbindung der Poren untereinander) vorgenommen. Dazu wurden die lichtmikroskopischen Untersuchungen durch computertomographische (CT) Bestimmungen des Porenraums bzw. -volumens ergänzt.

c) Analyse des Einflusses der KW auf die geomechanischen Gesteinseigenschaften.

Die Ergebnisse der in 2012 zu diesem Themenkomplex durchgeführten Laboruntersuchungen werden bis Mitte 2013 aufgrund ihres Umfangs und ihrer Spezifik in einem gesonderten Bericht der BGR dargestellt.

d) In-situ-Messungen in den Erkundungs- und Probenahmebohrungen

e) geophysikalische Untersuchungen

f) Experimente zur Abschätzung des Verhaltens der KW im Salzgestein bei Aufheizung

Zur Bestimmung der temperaturabhängigen Umwandlung bzw. Freisetzung von KW und zur Bewertung möglicher Rissbildungen bzw. Auflockerungen durch ansteigenden Porendruck sowie von geochemischen, durch Temperaturerhöhung induzierten Prozessen werden in Ergänzung zu den geomechanischen Laborexperimenten Aufheizversuche unter In-situ-Drücken und Entgasungsmessungen an (Steißfurt-)Hauptsalz-Proben (siehe HAMMER et al. 2012) im Labor der BGR durchgeführt. Dabei werden die Mengen der freigesetzten Gase ermittelt und geochemische Reaktionen der KW mit im Salzgestein enthaltenen anorganischen Verbindungen (z. B. im Hinblick auf thermochemische Sulfatreduktion) betrachtet. Über die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird im Abschlussbericht des Arbeitspaketes berichtet.

Parallel dazu finden Aufheizexperimente an Dickschliffen mittels Heiz-Kühltisch-Mikroskop statt, um die möglicherweise durch den Aufheizvorgang in den Gesteinen verursachten Gefüge- und Phasenveränderungen im mikroskopischen Maßstab zu beobachten.

Die ersten Ergebnisse der im Rahmen des Projektes „Weitererkundung Gorleben“ bis Ende 2011 durchgeführten KW-Studien wurden in einem Zwischenbericht zusammengefasst (HAMMER et al. 2012). Auf die Resultate dieser Untersuchungen wird im vorliegenden Zwischenbericht für das Jahr 2012 nicht ausführlich eingegangen; die Daten werden lediglich im Rahmen der Interpretation der neuen Untersuchungsbefunde herangezogen.

3 Makroskopisch sichtbare Verteilung der Kohlenwasserstoffe im Ostteil des Erkundungsbereiches 1

3.1 Verteilung der Kohlenwasserstoffe in den Probenahme- und Packerbohrungen im Querschlag 1 Ost

Für die systematische Untersuchung der KW-Verteilung im z. Zt. bergmännisch erschlossenen Teil des Salzstocks Gorleben wurden 2012 zur Vervollständigung der Befunde aus dem Q1W (HAMMER et al. 2012) insgesamt 20 Probenahme-Kurzbohrungen und 10 Packerbohrungen von jeweils 6,0 m bzw. 9,0 m (nach Verlängerung) Länge gestoßen. Die Bohrungen waren im Q1E im Knäuelsalz (z2HS1) und Streifensalz (z2HS2), im Streifensalz des Bohrortes 1.2 sowie im Kristallbrockensalz (z2HS3) im Bohrort 5.0 lokalisiert (siehe Abb. 49 und Abb. 70 sowie Tab. 8).

Auf Grund von Schmiermittelkontaminationen auf der Oberfläche der Bohrkerne (HAEGER & OSTERTAG-HENNING 2012a, siehe auch Kap. 6.1) konnten im Unterschied zum Q1W nicht die Teufenbereiche 4,5 m bis 6,0 m der Kurzbohrungen für die organogeochemische Analyse verwendet werden. Um nicht kontaminiertes Probenmaterial für die Bestimmung der Gehalte und der Zusammensetzung der KW zu nutzen, wurden nach aufwändiger Ursachensuche und Beseitigung der Kontaminationsquellen alle Kurzbohrungen im Q1E um 3 m auf eine Endteufe von 9,0 m verlängert. Im Zuge der Bohrungsbearbeitung wurden für die Kurzbohrungen RB663 bis RB682 sowie für die Packerbohrungen RB693 bis RB700 und die im Bohrort 5.0 gelegenen Packerbohrungen RB701 und RB702 UV-Profile der Bohrkerne unter UV-Strahlung bei $\lambda = 254$ nm bzw. bei Kunst-/Tageslicht erstellt (Anhang 1 bis 30).

Für die Erstellung der UV-Profile (Anhang 1 bis 30) erfolgte eine optische Einteilung der Bohrkerne in die von HAMMER et al. (2012) eingeführten UV-Klassen. Bei den in den UV-Profilen ausgehaltenen UV-Klassen handelt es sich um eine vereinfachte, von dem

makroskopisch sichtbaren Befund ausgehende Klassifizierung der KW-Vorkommen in den Bohrkernen. Die darauf basierende Einstufung der Gesteine ist keinesfalls als flächenhaft durchgängige Verbreitung von KW zu interpretieren, sondern weist nur UV-aktive Bereiche in der jeweiligen Bohrung aus. Darüber hinausgehende Aussagen zur räumlichen Verbreitung und zur möglichen Vernetzung der in den Bohrungen angetroffenen KW-Vorkommen sind auf der Grundlage dieser Bohrungseinstufungen nicht möglich.

Im Vergleich zu den Arbeiten im Q1W (siehe HAMMER et al. 2012) wurden im Q1E die UV-Klassen um die UV-Klasse „gesprenkelt“ erweitert, die wie folgt definiert wurde:

„gesprenkelt“

Bereiche mit dispers im Bohrkern verteilten bis clusterartigen, intra- bis teilweise interkristallinen, orange-rot fluoreszierenden Sprenkeln bei $\lambda = 254$ nm bzw. bei $\lambda = 352/368$ nm (Abb. 1).

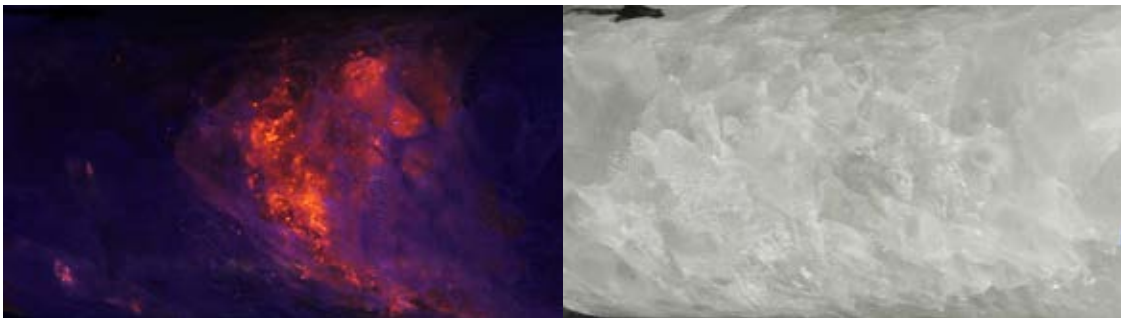


Abb. 1: Als „gesprenkelt“ eingestufter Probenkörper RB681-003 (Teufe 1,51 m bis 1,63 m, Bohrkern-durchmesser ca. 80 mm) unter UV-Strahlung (links) und im Auflicht (rechts).

Als Ursache für die orange-rot gesprenkelten Bereiche konnten fein im Gestein verteilte Karbonatkristalle (i.d.R. Dolomite) identifiziert werden (siehe Kap. 8.1), die v. a. in rekristallisierten Steinsalzbereichen des Q1E nachgewiesen wurden. Bei einer Nachbemusterung der Kerne wurden auch im Q1W entsprechende Zonen in den KW-Bohrungen festgestellt und in den ursprünglichen UV-Bohrungsprofilen (siehe HAMMER et al. 2012) nachträglich dokumentiert (siehe Abschlussbericht des Arbeitspaketes).

Von den zur Untersuchung der KW-Vorkommen in den Jahren 2011 und 2012 gestoßenen Probenahme-Kurzbohrungen wiesen lediglich die Bohrungen RB680, RB681 und RB682 (Q1E), die Packerbohrung RB700 (Q1E) sowie die Bohrungen RB660 und RB661 (Q1W) vermehrt orange-rote Sprenkel auf. Die orange-roten Sprenkel treten bevorzugt in rekristallisierten, klaren Steinsalzbereichen auf (Abb. 1). Für die Bewertung dieses Befundes ist wichtig, dass die orange-rot gesprenkelten Bereiche in den Bohrkernen der KW-Kurzbohrungen niemals eine gelblich-orange Eigenfluoreszenz oder eine KW-bedingte

bläulich-weiße Fluoreszenz aufweisen – ausgenommen hiervon sind Bereiche mit sekundärer Oberflächenkontamination durch z. B. Schmierfett, dessen Fluoreszenz das Glimmen der Sprengel überlagert. Das schwache Glimmen und die häufig disperse Verteilung der Fluoreszenzzentren erschweren die fotografische Dokumentation der rot-orange gesprenkelten Bereiche, da hierfür eine Langzeitbelichtung der Probe notwendig ist. Derartige Aufnahmen werden jedoch durch die von der UV-Quelle ausgesandte UV-Strahlung i.d.R. überstrahlt. Die Fotodokumentation der rot-orange gesprenkelten Bereiche umfasst somit nur Zonen mit einer intensiven Fluoreszenz.

Alle Probenahme- und Packerbohrungen, die rot-orange gesprenkelte Zonen aufweisen, sind stratigraphisch dem z2HS2 (Streifensalz) zuzuordnen und liegen im nördlichen Teil der auf KW erkundeten Querschlöge 1 West und 1 Ost. Darüber hinaus konnten in der 2011 vom Bohrort 1.8 (820 m-Sohle) nach Norden (d. h. annähernd parallel zum Q1W) gestoßenen Bohrung RB132 ebenfalls orange-rot gesprenkelte Zonen im Grenzbereich zwischen z2HS1 (Knäuelsalz) und z2HS2 (Streifensalz) beobachtet werden.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand werden die orange-rot gesprenkelten Bereiche im Streifensalz des Q1E deutlich häufiger als im Q1W beobachtet. Auffällig ist eine Häufung gesprenkelter Zonen im Grenzbereich zwischen Knäuel- und Streifensalz. Die Genese der orange-rot gesprenkelten Bereiche ist z. Zt. noch nicht geklärt und Gegenstand weiterführender, inkl. isotopengeochemischer Untersuchungen.

Neben den orange-roten Sprengeln wurde auch die gelblich bis orangefarbene Eigenfluoreszenz einiger Bohrkern (Abb. 2), die von Verunreinigungen an den Korngrenzen bzw. von zum Teil intrakristallin gelegenen Verunreinigungen (überwiegend anhydritische Partien) ausgeht, in die UV-Profile aufgenommen. Auch am Stoß bzw. an der Firste des Q1W wurde eine gelblich bis orangefarbene Fluoreszenz beobachtet (Abb. 3). Erste exemplarische Untersuchungen an unlöslichen Rückständen von Salzgesteinsproben aus diesen Bereichen zeigten, dass die beobachtete gelblich-orange Eigenfluoreszenz offenbar von mit Anhydrit vergesellschafteten Karbonatkristallen ausgeht.



Abb. 2: Kernsegment aus der Bohrung RB669 (Teufe 8,30 m bis 8,44 m) mit gelblich-oranger Eigenfluoreszenz. An den Korngrenzen der Halitkristalle sind zahlreiche kleine gelblich-orange Fluoreszenzcentren zu erkennen. Die Aufnahme wurde unter Verwendung des Programms Photoshop aufgehellt und der Kontrast reduziert, um die auf dem Originalphoto schwer zu erfassende Eigenfluoreszenz zu verstärken.

Es ist zu beobachten, dass sich das Vorkommen von KW-Schlieren im Q1W bzw. im Q1E sowie in den KW-Bohrungen tendenziell auf diejenigen Gesteinsbereiche konzentriert, die keine gelblich-oranger Eigenfluoreszenz oder orange-rote Sprenkel aufweisen (Abb. 3, Abb. 5 und Abb. 8).



Abb. 3: Streifenartige Bereiche gelblich- bis orangefarbener Fluoreszenz am Weststoß des Q1W auf der 840 m-Sohle im Erkundungsbergwerk Gorleben. Bereichsweise treten lokal begrenzt KW (erkennbar an der weißlich-bläulichen Fluoreszenz) aus dem Gebirge aus und verteilen sich großflächig über Stoß und Firste. Dabei wird durch das schwerkraftgetriebene Herunterlaufen der KW am Stoß ein scheinbar großflächiges KW-Vorkommen suggeriert (Aufnahme: DBE).

Kernsegmente, aus denen Proben für die quantitative und qualitative KW-Analyse gewonnen wurden (sofortige Überführung der Salzproben nach ihrer Gewinnung in eine Wasservorlage), standen für die Kerndokumentation unter UV-Strahlung nicht mehr zur Verfügung. Die entsprechenden Kernabschnitte wurden in den UV-Profilen (Anhang 1 bis 20) als „KW-Probe für Geochemie“ gekennzeichnet und durch Interpolation über die angrenzenden Kernabschnitte einer UV-Klasse zugeordnet.

Die nach der organochemischen Beprobung verbliebenen Kernbereiche der Probe- nahme-Kurzbohrungen und die Bohrkernbereiche der Packerbohrungen wurden an die BGR überführt und die UV-aktiven Bereiche unter Kunstlicht sowie UV-Strahlung bei $\lambda = 254 \text{ nm}$ und im Durchlicht photographisch dokumentiert. Unter UV-Strahlung kommt es in der näheren Umgebung fluoreszierender Bereiche durch die Transparenz der Halitkristalle zu fahl bläulich-weißen (im Bereich von KW) bzw. gelblich-orange bis orange-rot (in gesprenkelten Bereichen) schimmernden Halo-Effekten in den angrenzenden Halitkristallen. Durch den Halo erscheinen UV-aktive Bereiche deutlich größer, als dies in Wirklichkeit der Fall ist (siehe HAMMER et al. 2012 und Abb. 4). Deutlich wird der bei der Bewertung der UV-Bilder zu berücksichtigende Halo-Effekt auch, wenn für die Probenmarkierung UV-aktive Textmarker verwendet wurden.

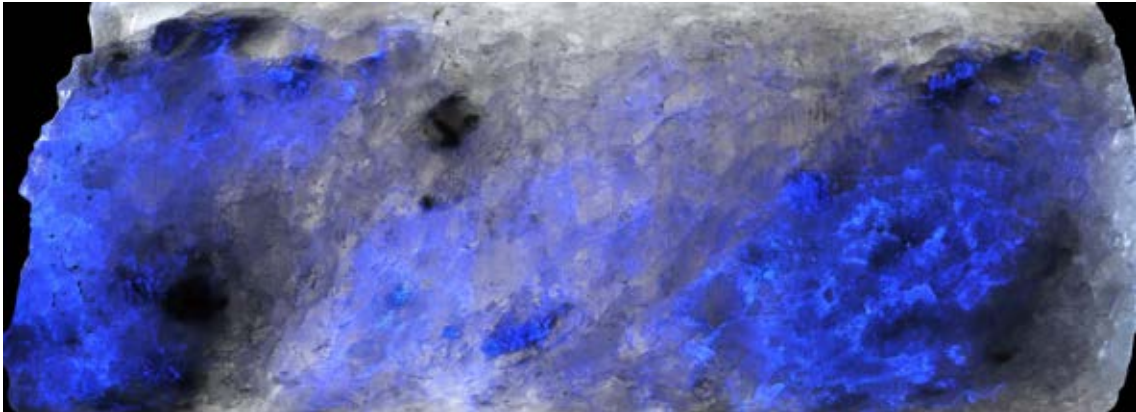


Abb. 4: Kernsegment aus der Bohrung RB669 (Teufe 7,50 m bis 7,66 m) mit interkristallinen KW und bereichsweise ausgeprägtem Halo-Effekt. Die Bohrung RB669 stellt die einzige Kurzbohrung im Q1E dar, in der größere KW-imprägnierte Bereiche beobachtet wurden.

Die Dokumentation der sofort nach der Kerngewinnung entnommenen Aufheizproben erfolgte wie im Jahr 2011 in den seit der Probenahme luftdicht geschlossenen Probengefäßen, um keine Veränderung der Probenatmosphäre und damit eine Verfälschung der Messwerte zu verursachen. Da die Probengefäße bei $\lambda = 254$ nm eine gelblich-weiße Eigenfluoreszenz aufweisen und somit die vom Bohrkern ausgehende Fluoreszenz überstrahlen, wurden die Heizproben durch Anregung mit UV-Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 352/368$ nm dokumentiert. Auf Grund der geringeren Anregungsenergie und der Abschottung durch die Probengefäße weisen die Heizproben eine geringere Fluoreszenzintensität im Vergleich zu den übrigen Proben auf, die sich auch in der Photodokumentation niederschlägt.

Zwecks anschaulicherer Darstellung der Besonderheiten hinsichtlich der Verteilung der KW bzw. der UV-aktiven Bereiche in den Bohrkernen wurden aus den einzelnen, paarweise deckungsgleich vorliegenden Kunstlicht- und UV-Aufnahmen ebenfalls Kombinationsaufnahmen „Auflicht und UV-Strahlung“ (vgl. HAMMER et al. 2012) erstellt.

Ausgehend von der KW-Kartierung der Bohrkern und der untertägigen Aufschlüsse sind im Q1E deutlich weniger KW-Vorkommen zu beobachten als im Q1W (siehe auch Anhang 1 bis 30). Das Fehlen von Hinweisen auf ähnlich häufige KW-Vorkommen wie im Q1W bestätigt die Erkundungsergebnisse, die bis zum Moratorium im Jahr 2000 vorlagen (siehe auch BORNEMANN et al. 2008, HAMMER et al. 2012). Die organochemischen Untersuchungen an den Kernen der Probenahme-Kurzbohrungen aus dem Q1E ergaben im Vergleich zum Q1W nur sehr wenige Proben aus lokal eng begrenzten Hauptsalzbereichen mit erhöhten KW-Gehalten (siehe Kap. 6).

Die wenigen UV-aktiven Bereiche konzentrieren sich in den KW-Kurzbohrungen des Q1E überwiegend auf die Korngrenzen der Halit- und Anhydritkristalle (Abb. 4) bzw. auf sekundäre Risse im Halit, unabhängig davon, ob es sich um anhydritreiche oder um anhydritarme,

rekristallisierte Steinsalzbereiche handelt. In der halitischen Matrix sind die durch KW hervorgerufenen UV-aktiven Bereiche als Schlieren, auskragende Wolken, Inseln, Fetzen und gelegentlich Lagen ausgebildet, welche sowohl bereichsweise zusammenhängend als auch voneinander isoliert vorliegen. Auf Grund der makroskopischen Befunde an den Bohrkernen und in den Aufschlüssen sind die KW-Imprägnationen im Hauptsalz des Q1E analog denen im Q1W als überwiegend interkristallin einzustufen.

Entgegen der Vorstellung, dass es sich bei den KW-Zutritten aus dem Hauptsalz um großflächige Kondensat-Zutritte handelt, belegen Photos aus dem Jahr 2012 im Umfeld der KW-Bohrung RB648 (Q1W), dass es sich bei den eigentlichen Zutrittsstellen um relativ kleinräumige Zutrittspunkte handelt, an denen die KW freigesetzt werden. Die Aufnahmen (Abb. 5) verdeutlichen, dass es sich auch bei dem großen Kondensatfleck im Q1W nicht um eine einzelne, sondern um mehrere kleine Zutrittsstellen handelt, an denen durch die an die Auffahrung gebundene Gesteinsauflockerung Kondensat freigesetzt wird, welches sich im Umfeld der einzelnen Zutrittsstellen langsam auf der Stoßoberfläche verteilt. Die Aufnahmen lassen darüber hinaus erkennen, dass die Kondensatflecken mit der Zeit eine geringere Fläche einnehmen und langsam wieder verblassen, was auf eine endliche, relativ geringe Größe der KW-Vorkommen schließen lässt.

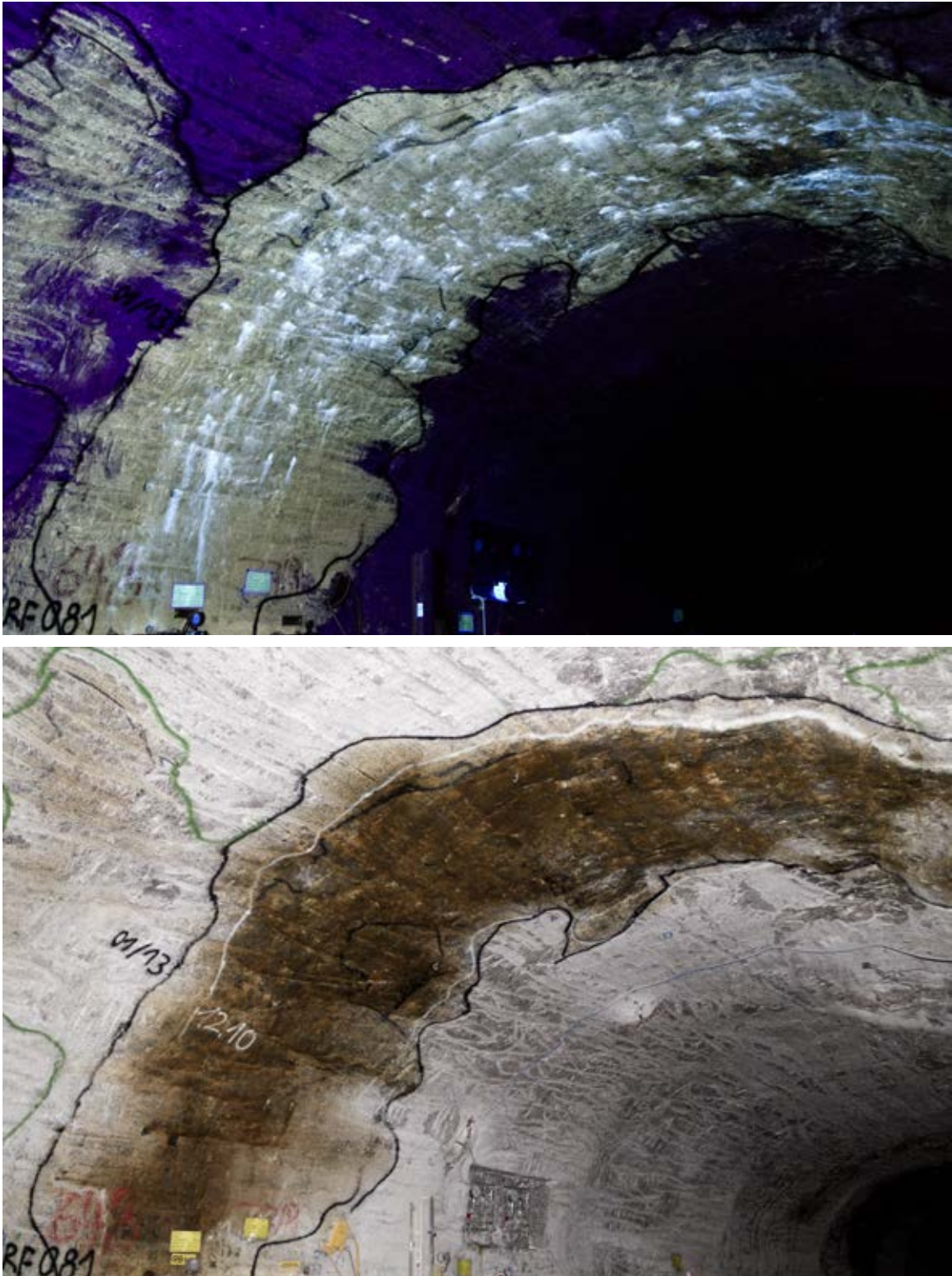


Abb. 5: UV- (oben) und Kunstlichtaufnahme (unten) des Oststoßes des Q1W im Bereich des großen Kondensatflecks im Umfeld der Bohrung RB648. Die Aufnahmen aus dem Jahr 2012 verdeutlichen, dass es sich bei dem großen Kondensatfleck nicht um einen einzelnen großen Zutritt handelt, sondern vielmehr um zahlreiche kleine, die einen scheinbar großflächigen Zutritt suggerieren (Aufnahmen: DBE).

3.2 Schlussfolgerungen aus der Kohlenwasserstoffverteilung in den Bohrkernen

Sowohl die UV-Profile der KW-Probenahme-Kurzbohrungen (Anhang 1 bis 20) als auch die der Packerbohrungen (Anhang 21 bis 30) zeigen, dass sich, anders als im Q1W, das Vorkommen der UV-aktiven (i.d.R. aromatischen) KW im Q1E auf wenige Bohrungen beschränkt. Es konnten nur in den Probenahme-Kurzbohrungen RB667, RB669 und RB681 fluoreszierende KW nachgewiesen werden, wobei nur die Bohrung RB669 flächenmäßig größere KW-Vorkommen aufweist. Bei den im Jahr 2012 neu gestoßenen Packerbohrungen (im Q1E, BO1.2 und BO5.0; siehe Kap. 9) wurden fluoreszierende KW in den Bohrungen RB694 (Bohrort 1.2) und in den Bohrungen RB695, RB696 und RB697 (Bohrort 3.1; Kreuzungspunkt mit Q1E) sowie in Schlieren in den Bohrungen RB701 und RB702 (Bohrort 5.0) im Nordosten des EB1 des Erkundungsbergwerkes Gorleben auf der 840 m-Sohle nachgewiesen.

Ähnlich wie im Q1W ist auch im Q1E auf Grund der ungleichmäßigen Verteilung der unter UV-Strahlung sichtbaren KW anzunehmen, dass es sich bei den KW-Vorkommen im z2HS1 (Knäuelsalz) im Kreuzungsbereich des Q1E mit dem Bohrort 3.1 (Abb. 6) ebenfalls um voneinander isolierte Vorkommen bzw. KW-Anreicherungen handelt, die nicht miteinander in Verbindung stehen. Diese Annahme wird durch die benachbarten KW-Bohrungen RB668, RB670, RB671 und RB672 bestätigt, welche keine erkennbaren Hinweise auf das Vorhandensein von KW liefern (siehe Abb. 6).

Analog zum Q1W befinden sich auch im Q1E die größten KW-Ansammlungen im Kernbereich der Salzstruktur und damit im ältesten Teil des Hauptsalzes (Knäuelsalz, z2HS1). Die KW-Vorkommen im Knäuelsalz sind vermutlich entlang von Scher- und/oder Bewegungsbahnen orientiert (Abb. 7), die beim Salzaufstieg temporär die Migration von Fluiden ermöglichten, aber inzwischen wieder verheilt sind. Im Verlaufe des viele Mio. Jahre andauernden Salzaufstiegs werden sowohl das Steinsalz mit seinen Anhydritlagen als auch die früh während der Halokinese gebildeten Bewegungsbahnen, auf denen die KW migrierten und fixiert wurden, immer wieder zerrissen und voneinander isoliert. Aufgrund des Salzkriechens verheilen diese wieder zu einem undurchlässigen Gesteinsverband (Abb. 8).

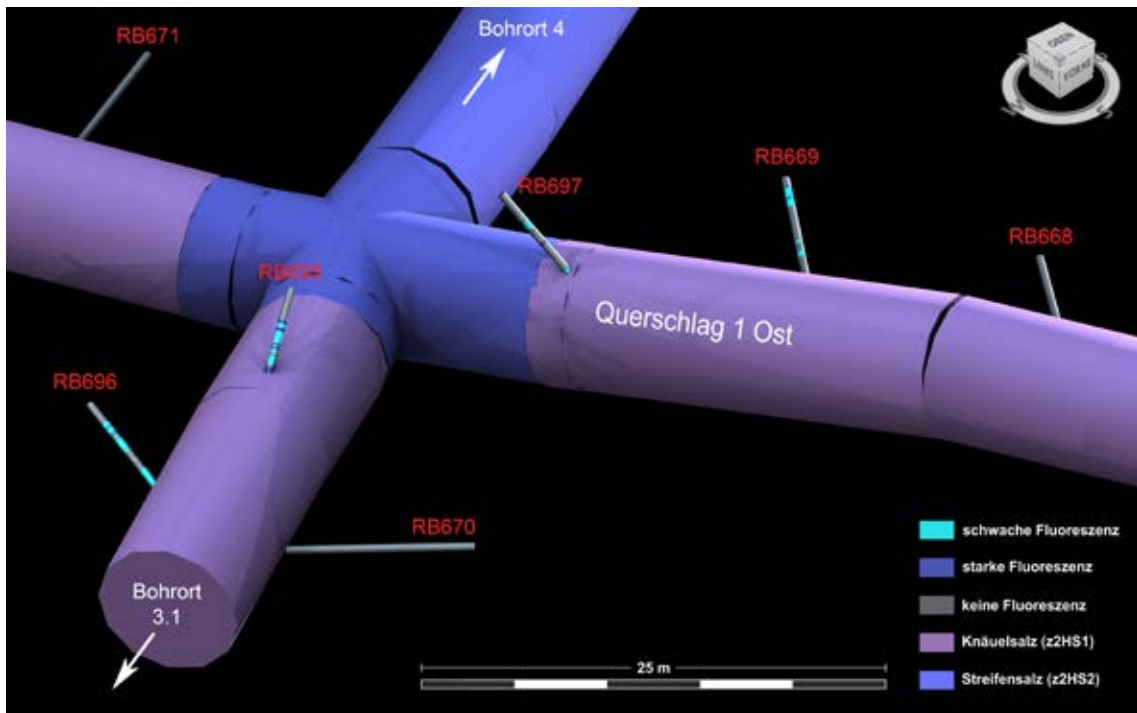


Abb. 6: Streckenkreuz der Bohrorte 3.1 und 4.0 mit dem Q1E im Zentralbereich des Hauptsattels im Salzstock Gorleben. Einzig die KW-Bohrung RB669 sowie die Packerbohrungen RB695, RB696 und RB697 zeigten unter UV-Licht (254 nm) Bereiche mit KW-Fluoreszenz. Die Kerne aller übrigen Bohrungen weisen keine UV-Fluoreszenz auf.



Abb. 7: UV-Aufnahme von halokinetisch entstandenen, partiell KW-führenden, inzwischen wieder verheilten Scher- und/oder Bewegungsbahnen im Q1W im Bereich der KW-Bohrung RB645 (rechts unten im Bild ist das Manometer zur Druckmessung in der Bohrung sichtbar). Die Ausdehnung der Kondensatflecken ist z. T. sekundären Ursprungs und das Resultat der sich in Folge der Auflockerung und Beraubung auf der Oberfläche verteilenden KW (Aufnahme DBE). Bildbreite ca. 5 m, Bildhöhe ca. 3 m.



Abb. 8: UV-Aufnahme im Q1W (Blickrichtung von SSE). Die KW erscheinen im Q1W als gelblichweiße Kondensatfahnen, die sich, ausgehend von einigen, wenige cm-breiten, bläulichweißen Schlieren (vgl. Abb. 5, 7 und 9) infolge von Beraubearbeiten und daran gebundenen Verschmierungen sowie durch die Schwerkraft großflächig am Stoß und an der Firste verteilen. Die KW-Belastung im Q1W erscheint in Folge dessen deutlich größer und suggeriert ein scheinbar großflächiges KW-Vorkommen (Aufnahme DBE).

Auch die überwiegend lagen- bzw. bandartig ausgebildeten KW-Vorkommen im Streifen- und sehr selten im Kristallbrockensalz (Bohrort 1.2 - Streifensalz, Abb. 9 und Abb. 10; Bohrort 5.0 - Kristallbrockensalz; siehe Kap. 7) bestätigen diese Vorstellungen. Diese näher zum Flankenbereich des Hauptsattels nachgewiesenen KW folgen ebenfalls während des Salzaufstiegs temporär aktiven Bewegungsbahnen, die möglicherweise durch ihre Flankennähe während späterer Phasen des Diapirismus nicht wieder zerrissen und verschleppt wurden.

Über die genaue Verbreitung UV-inaktiver KW ist makroskopisch keine Aussage möglich, da die entsprechenden organischen Verbindungen nicht mittels Fluoreszenz, sondern nur geochemisch oder lasermikroskopisch nachzuweisen sind.

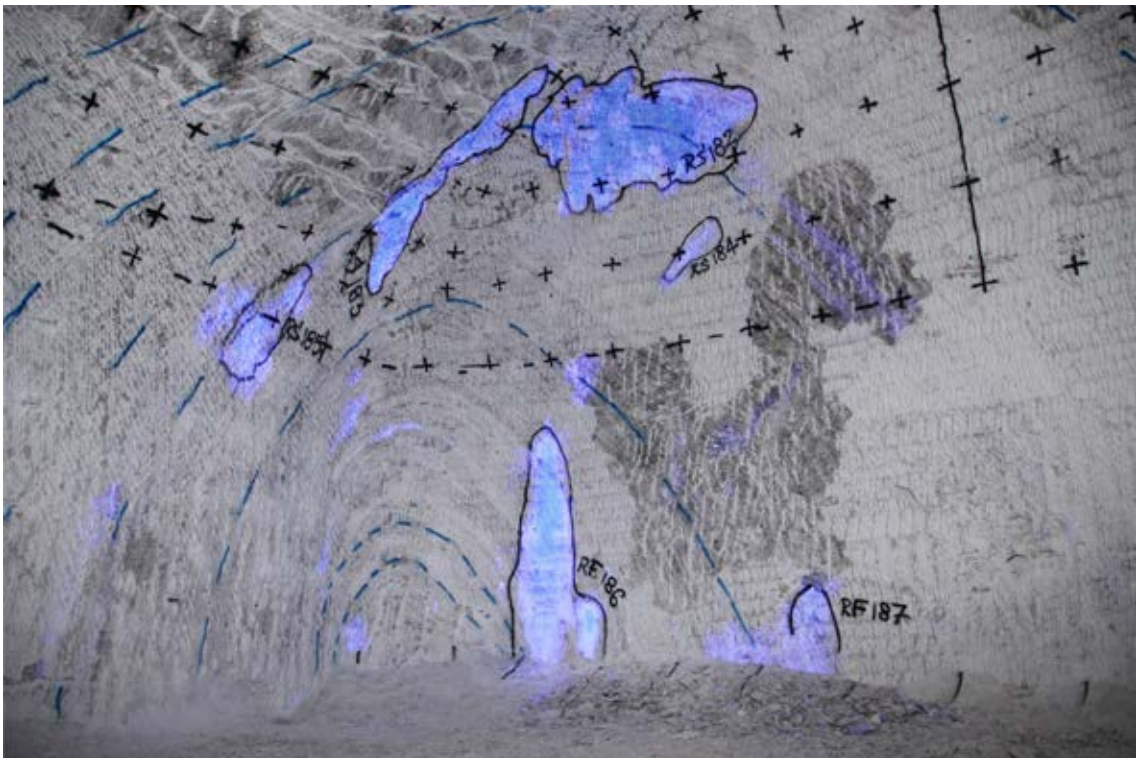


Abb. 9: Kombinationsaufnahme „Kunstlicht und UV-Strahlung“ aus den Stoß-Aufnahmen im Bohrort 1.2 (Höhe des Zutritts RF187 unten rechts ca. 1 m; Aufnahme: DBE). Die UV-aktiven KW sind lagig, meist der Schichtung folgend, in dünnmächtigen Anhydritschichten oder anhydritreichen Halitschichten des z2HS2 angeordnet, die beim Salzaufstieg verfault wurden. Bereichsweise treten die KW in Folge der Auflockerung des Gebirges durch die Bohrortaufahrung aus und verteilen sich großflächig als Kondensatflecken und -fahnen am Stoß, wodurch ein scheinbar großflächiges Vorkommen suggeriert wird.



Abb. 10: Kombinationsaufnahme „Durchlicht und UV-Strahlung“ für einen Probenkörper aus dem Streifensalz (RB773-001 bei Teufe 0,70 m bis 0,94 m). Die lagenartig ausgebildeten, UV-aktiven Bereiche befinden sich innerhalb des betrachteten Kernsegmentes ausschließlich an den Korngrenzen klarer, rekristallisierter Halitkristalle.

Bei den wenigen UV-aktiven KW-Bereichen im Hauptsalz des Q1E handelt es sich überwiegend um die während des Salzaufstieges zerrissenen und verknäuelten Relikte von ursprünglichen, früh-halokinetischen KW-Migrationspfaden oder KW-Kluftspeichern (Anhydrit-Lagen), wie sie u.a. in den Bohrorten 1.2 (Abb. 9 und Abb. 10, im z2HS2)

bzw. 5.0 (Kap. 7, im z2HS3) aufgeschlossen sind. Es ist davon auszugehen, dass die KW im Zuge des Salzaufstieges entlang von Scher- bzw. Rekristallisationsbahnen oder temporär beim Salzaufstieg vorhandenen Rissen aus dem Muttergestein in das Salz migrierten, zusammen mit den verheilenden bzw. rekristallisierten Hauptsalz-Bereichen oder den geklüfteten Anhydrit-Partien bei der Halokinese aufstiegen, dabei z. T. zerbrachen und heterogen im Salzstock verteilt wurden. Dies erklärt die unregelmäßige Verteilung der KW in den Querschnitten 1 West und 1 Ost.

4 Petrographisch-mikrostrukturelle Untersuchungen zur Klärung der Verteilung und Genese der Kohlenwasserstoffe

Für die gefügekundlich-mikrostrukturellen Untersuchungen der KW-führenden Hauptsalz-Proben aus dem Q1E wurden aus Kernen der Probenahme-Kurzbohrungen Dünnschliffe hergestellt, welche im Hellfeld bzw. unter gekreuzten Polarisatoren analysiert wurden; Dickschliffe wurden zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht untersucht.

4.1 Petrographische Beschreibung der Proben und Verteilung der Kohlenwasserstoffe im Dünnschliff

Bei den bisher untersuchten 6 Proben aus dem Q1E handelt es sich um Proben aus dem Knäuelsalz (z2HS1) der Staßfurt-Folge, aus dem Liegenden des Streifensalzes (z2HS2) sowie aus dem Übergangsbereich Knäuelsalz - Streifensalz. Jeder Schliff wurde mittels Diascanner (im Maßstab 1:1 mit einer Scanauflösung von 4000 dpi) im Hellfeld und unter Zuhilfenahme von Polarisationsfolie bei gekreuzten Polarisatoren (vgl. HAMMER et al. 2012) vollflächig dokumentiert.

Für die Anfertigung der Dünnschliffe wurden Probenkörper von jeweils 6 cm x 4 cm aus dem Zentralbereich der Bohrkerns gewonnen. Analog zur Vorgehensweise im Q1W wurde zusätzlich zu jeder Dünnschliff-Probe je eine Geochemie-Probe genommen.

Die in den Dünnschliffen aus dem z2HS1 und z2HS2 des Q1E beobachtete Gesteinsmatrix besteht aus mittel- bis grobkristallinen, xeno- bis hypidiomorphen, plattigen und elongiert eingeregeltten Halitkristallen bis ca. 2 cm Korngröße. Die Halitmatrix ist durchsetzt von fein dispers verteilten, stängeligen bis tafeligen Anhydritkristallen sowie von Schlieren und 1 cm bis 2 cm großen Knäueln von Anhydrit bzw. Bruchstücken verfalteter, ehemaliger Anhydritlagen bis ca. 2,5 cm x 5 cm. Die Halitkristalle sind überwiegend klar und frei von Fluideinschlüssen oder Rissen. Nur vereinzelt sind würfelförmige Fluideinschlüsse entlang von verheilten Altrissen oder entlang der von den Korngrenzen ausgehenden Spaltflächen zu beobachten. Gelegentlich sind in diesen Gasblasen (Anteil der Gasphase ~ 30 bis 70 %)

bis 1 µm Größe zu erkennen (Abb. 11). Ein Teil der Risse ist eindeutig auf anthropogen bedingte, mechanische Belastung des Probenbereiches (z. B. EDZ der Streckenauffahrung, Bohr-/Probenpräparationsprozesse etc.) zurückzuführen. An den Korngrenzen der Halitkristalle sind dispers verteilte, idiomorphe, intakte bis kantengerundete/gerundete, randlich alterierte idio- bis xenomorphe Anhydritkristalle bis 650 µm * 390 µm Größe zu beobachten. Im Alterationssaum weisen einige Anhydrite zahlreiche Fluideinschlüsse auf. Auch innerhalb der Halitkristalle sind eingeschlossene, alterierte Anhydritkristalle zu erkennen. Fluideinschlüsse sind in den Schliffen aus dem Q1E nur vereinzelt als i.d.R. dendritisch verästelte Einschlüsse entlang der Korngrenzen oder Risse im Halit zu beobachten.

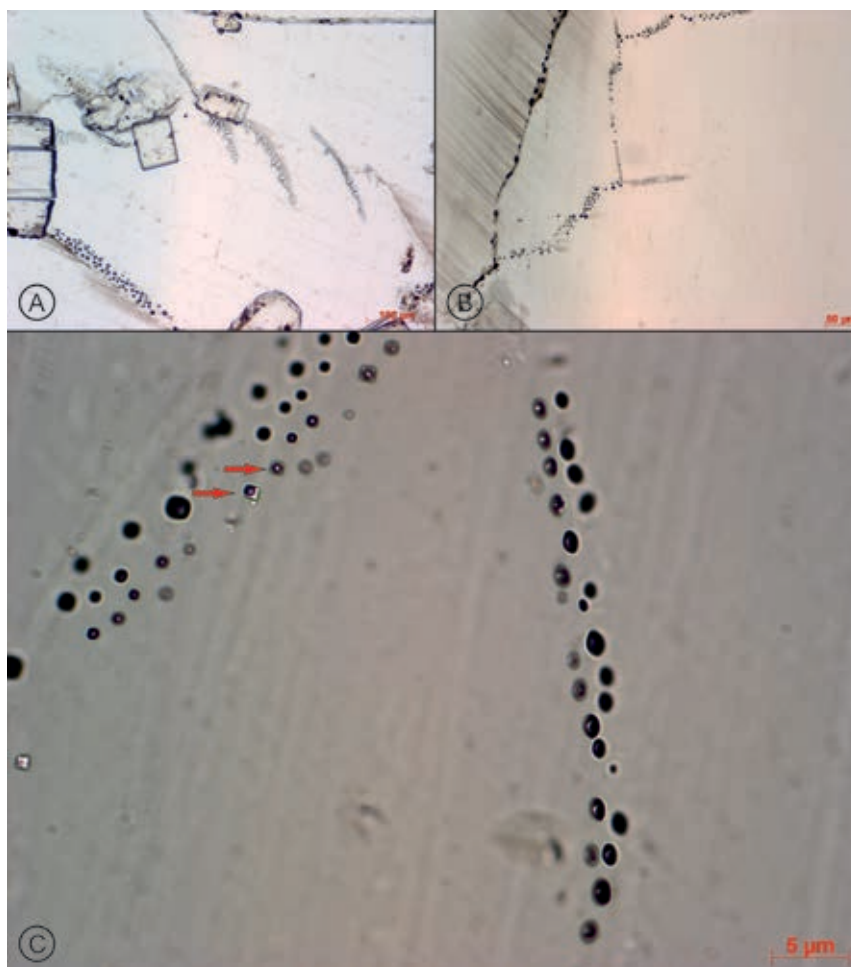


Abb. 11: A) Fluideinschlüsse an den Korngrenzen der Halitkristalle (links unten) und auf der Oberfläche von an den Korngrenzen gelegenen Anhydrit (links), sowie fluid-gefüllte Risse (mittig) im Halit (RB669, Teufe 7,31 m bis 7,36 m, Hellfeld).
 B) Sekundäre, vermutlich dendritisch verästelte Fluideinschlüsse an den Korngrenzen der Halitkristalle (links) neben verheilten und von würfelförmigen Fluideinschlüssen nachgezeichneten, sekundären Rissen (mittig) entlang der Spaltflächen des Halitkristalls (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, Hellfeld).
 C) Nahaufnahme sekundärer, würfelförmiger Fluideinschlüsse, teilweise mit Gasblase (rote Pfeile) entlang verheilten Risse/Spaltflächen im Halit (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, Hellfeld).

Die in den Dünnschliffen enthaltenen, idio- bis xenomorphen, intakten bis randlich alterierten Anhydritkristalle liegen in mehreren Generationen vor. Sie erreichen eine Größe von bis zu $954 \mu\text{m} \times 370 \mu\text{m}$ und sind i.d.R. stängelig bis tafelig ausgebildet. Sie weisen Anzeichen von Drucklösung auf. Außer in Schlieren und Knäueln treten die Anhydritkristalle fein verteilt entlang der Korngrenzen der Halitkristalle sowie als intrakristalline Einschlüsse im Halit auf. Im Bereich der Alterationssäume sind an den betroffenen Anhydritkristallen gelegentlich Fluidansammlungen zu beobachten. Die Anhydritkristalle in den Anhydritknäueln sind eingeregelt und mit Ton bzw. Organika sowie akzessorischen Pyrit- und Karbonatkristallen vergesellschaftet. Teilweise enthalten die Anhydritknäuel halitgefüllte Hohlräume, deren Wände mit großen, idiomorphen Anhydritkristallen sowie xeno- bis hypidomorphem Karbonat ausgekleidet sind (Abb. 12, Abb. 13 und Abb. 15). Gelegentlich sind Anhydritkristalle zu beobachten, die mit idiomorphen Karbonat- bzw. Pyritkristallen verwachsen sind. Vereinzelt treten auch im Q1E die für den Q1W typischen Anhydritkristalle mit spaltflächenparallelen Kapillaren (siehe HAMMER et al. 2012) auf (Abb. 14).

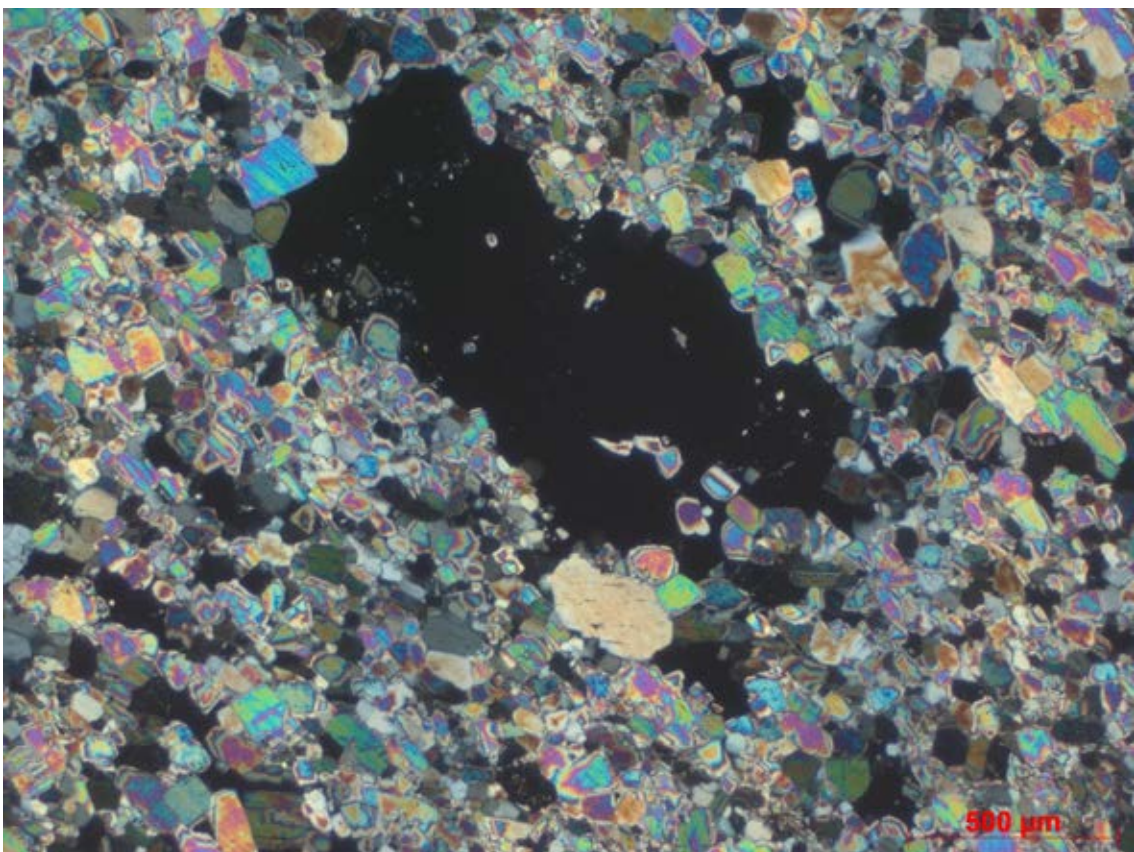


Abb. 12: Mit Halit gefüllter Hohlraum innerhalb eines mindestens $5,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$ großen, verfalteten Anhydritknäuels. Die benachbarten Anhydritkristalle sind eingeregelt, randlich alteriert und weisen Anzeichen von Drucklösung auf (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, x-Pol).

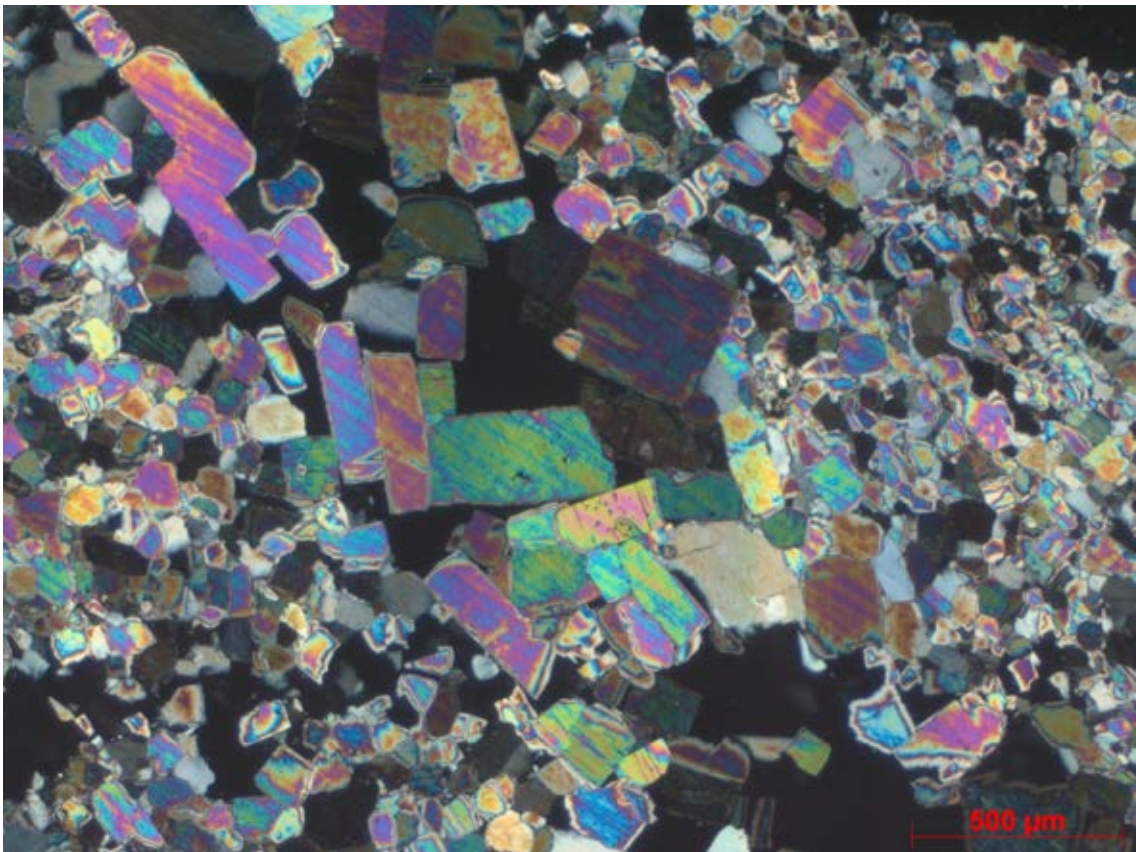


Abb. 13: Mit Halit gefüllter Hohlraum entlang eines Faltenschenkels innerhalb eines Anhydritknäuels. Große idiomorphe Anhydritkristalle säumen die Faltenschenkel der ehemaligen Anhydritlage (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, x-Pol).

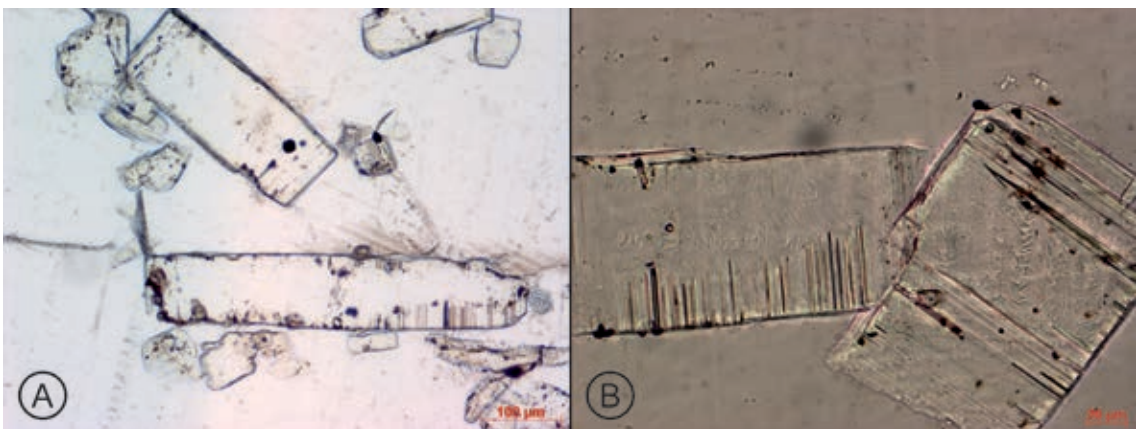


Abb. 14: A) Stängelige Anhydritkristalle mit spaltflächenparallelen Kapillaren. Die Kristalle zeigen teilweise randliche Alterationssäume und sind mit idiomorphen Pyritkristallen (Bildmitte) bzw. Dolomit (unterer Kristall) verwachsen (RB669, Teufe 7,31 m bis 7,36 m, Hellfeld).
 B) Stängelige bis tafelige Anhydritkristalle mit spaltflächenparallelen Kapillaren und anhaftenden Fluidmenisken (RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, Hellfeld, Stack-Aufnahme über 16 µm).

Akzessorisch wurden in sämtlichen Schliffen hypidio- bis idiomorphe Karbonatkristalle bis $398\ \mu\text{m} * 389\ \mu\text{m}$ Größe (vereinzelt bis $730\ \mu\text{m} * 500\ \mu\text{m}$, Abb. 15), sowie hypidio- bis idiomorphe kuboktaedrische Pyritkristalle zwischen $9\ \mu\text{m}$ und $60\ \mu\text{m}$ Durchmesser (vereinzelt bis $100\ \mu\text{m}$ Durchmesser) beobachtet. Sowohl die Karbonate als auch die Pyrite liegen als Einkristalle bzw. Aggregate (Karbonataggregate bis $2,2\ \text{mm}$ Durchmesser, Pyritaggregate bis $130\ \mu\text{m} * 90\ \mu\text{m}$ Größe) isoliert in der Halitmatrix (Abb. 15 A bis C bzw. Abb. 16 A) oder in Vergesellschaftung mit Anhydrit in Anhydritknäueln (Abb. 15 D bis F bzw. Abb. 16 B) vor. Die Karbonat- und Pyritkristalle sind dabei fast immer mit einem oder mehreren Anhydritkristallen (intakt bis stark alteriert) verwachsen (Abb. 15 A & B und Abb. 16 C & D) bzw. kleiden – zum Teil vollständig (Abb. 15 F) – Teile der Wände der in Anhydritknäueln auftretenden, halitgefüllten Hohlräume aus (Abb. 15 D & E).

Ein Teil der isoliert in der Halitmatrix vorkommenden und nicht an Anhydritknäuel gebundenen Karbonatkristalle weist eine auffällige Zonierung auf (Abb. 15 B), wobei sich mit Organika/Ton verunreinigte Zonen mit reineren Zonen abwechseln. Derartige Kristalle weisen auf mehrfache Veränderungen der Bildungsbedingungen der Karbonatkristalle hin, die vor bzw. im Zuge der ersten Anhydritbildung stattfanden, da die Verwachsung mit Anhydrit erst nach der Zonierung der Karbonate erfolgte (Abb. 15 B). Bei diesen zonierten Karbonatkristallen handelt es sich folglich um erhalten gebliebene, primär während der Karbonatfazies bzw. frühen Anhydritfazies gebildete Karbonate.

Auch für die Karbonate im Q1E ist ähnlich wie im Q1W (siehe HAMMER et al. 2012) eine exakte lichtmikroskopische Bestimmung der Karbonatspezies nicht möglich. Es ist jedoch anzunehmen, dass analog zum Q1W EDX-Messungen im Rasterelektronenmikroskop auf magnesiumhaltige Karbonate (Dolomit) hinweisen dürften; entsprechende Analysen sind z. Zt. in Realisierung.

Die Pyritkristalle bilden perfekte bis verzerrte Pentagondodekaeder bzw. Würfel und/oder Kuboktaeder aus, welche i.d.R. an die Anhydritkristalle gebunden sind bzw. mit diesen verwachsen oder in ihnen eingeschlossen sind.

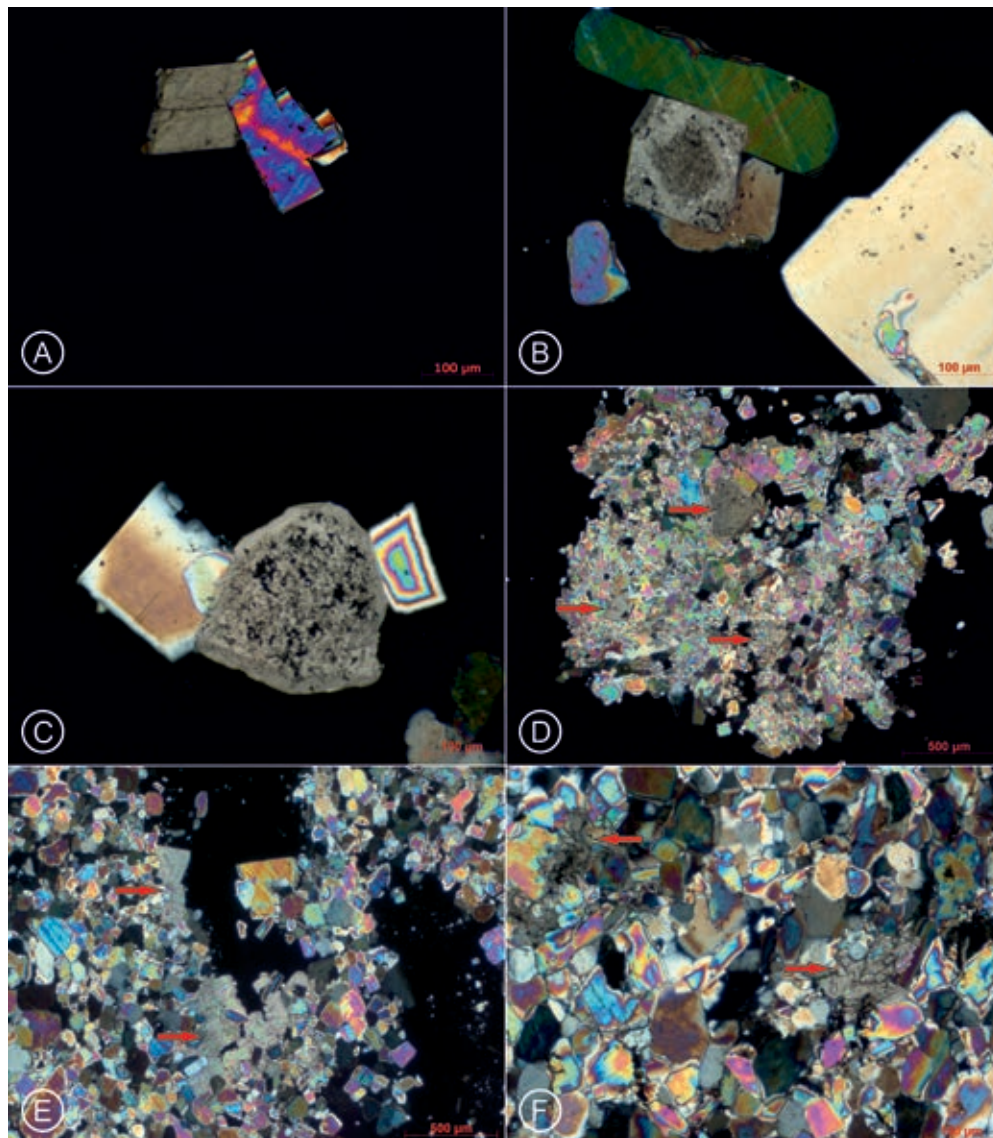


Abb. 15: A) Pastellfarbener idiomorpher Karbonat-/Dolomitkristall, verwachsen mit stängeligem, an den Endflächen leicht alterierten Anhydrit mit bläulich-rötlichen Interferenzfarben (RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, X-Pol).
 B) Idiomorpher Karbonat-/Dolomitkristall mit Anwachssäumen (Phantomkristallen). Die einzelnen Karbonat-Wachstumszyklen weisen auf eine mehrfache Veränderung der Bildungsbedingungen des Kristalls hin, ehe dieser mit den im Schliff sichtbaren Anhydritkristallen verwachsen ist (RB672, Teufe 8,35 m bis 8,41 m, X-Pol).
 C) Hypidio- bis xenomorpher Karbonat-/Dolomitkristall mit deutlich sichtbaren tonig-organischen Verunreinigungen, verwachsen mit z. T. stark alterierten Anhydritkristallen (RB672, Teufe 8,35 m bis 8,41 m, X-Pol).
 D) Anhydritknäuel aus körnigen, alterierten Anhydritkristallen mit kleinen, haliterfüllten Hohlräumen und eingeschlossenen, idiomorphen Karbonat-/Dolomitkristallen (Pfeile) in halitischer Matrix (RB669, Teufe 7,31 m bis 7,36 m, X-Pol).
 E) Hypidio- bis idiomorphe Karbonat-/Dolomitkristalle (Pfeile) säumen einen Teil eines mit Halit gefüllten Hohlraums innerhalb eines Anhydritknäuels aus randlich alterierten, körnigen Anhydritkristallen (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, X-Pol).
 F) Hypidio- bis xenomorphe Karbonat-/Dolomitkristalle (Pfeile), vollständig verwachsen mit körnigen, randlich alterierten Anhydritkristallen (Anhydritknäuel). Bereichsweise sind tonig-organische Schlieren in den Kornwickeln der Anhydritkristalle zu erkennen (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, X-Pol).

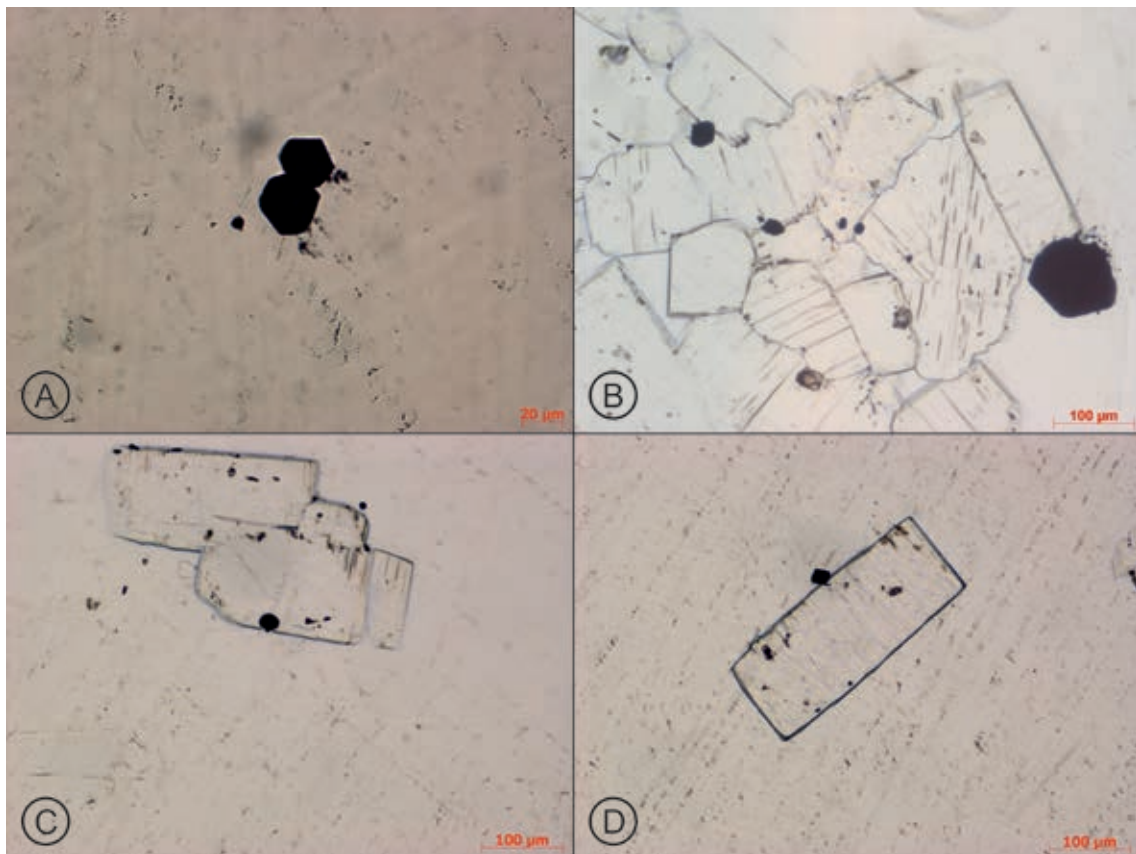


Abb. 16: A) Pyritaggregat aus zwei ca. 20 µm bis 30 µm durchmessenden, idiomorphen Pyritkristallen (Pentagondodekaeder) isoliert in halitischer Matrix (RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, Hellfeld).
 B) Mehrere kleine idiomorphe bis teilweise verzerrte Pyritkristalle (Pentagondodekaeder) bis ca. 30 µm Durchmesser und ein hypidiomorpher Pyritkristall bis ca. 100 µm Durchmesser im Randbereich eines Anhydritknäuels aus randlich alterierten, Anzeichen von Drucklösung und Spaltflächen aufweisenden Anhydritkristallen (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, Hellfeld).
 C) Verwachsene Anhydritkristalle mit randlichen, spaltflächenparallelen Kapillaren in halitischer Matrix. Der untere Kristall umschließt einen 10 µm bis 20 µm durchmessenden, idiomorphen Pyritkristall (Pentagondodekaeder; RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, Hellfeld).
 D) Idiomorpher Anhydritkristall mit spaltflächenparallelen Kapillaren in halitischer Matrix. Auf dem Anhydritkristall ist ein ca. 20 µm durchmessender, verzerrter Pentagondodekaeder bis Kuboktaeder (schwarz) zu erkennen (RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, Hellfeld).

Zusätzlich sind in den Dünnschliffen bevorzugt im Umfeld von Anhydritschlieren und -knäueln, aber auch an den Korngrenzen von Halitkristallen vereinzelt idiomorphe, länglich gestreckte Quarzkristalle (i.d.R. Doppelender) zu beobachten. Teilweise sind die Quarzkristalle zu Aggregaten (v.a. Gwindel) verwachsen.

4.2 **Schlussfolgerungen aus der Analyse der Kohlenwasserstoffverteilung in den Dünnschliffen**

Die Analyse der Dünnschliffe aus dem Q1E zeigte im Vergleich zu den Dünnschliffen aus dem Q1W keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung und der strukturellen Ausbildung der Gesteine. Die Halitkristalle aus den KW-führenden

Gesteinen sind sowohl im Q1W wie auch im Q1E überwiegend klar, rekristallisiert und frei von Einschlüssen. Die Korngrößen der Halitkristalle schwanken zwischen wenigen Millimetern bis mehreren Zentimetern. An den Korngrenzen sind eingeregeltere Anhydritkristalle unterschiedlicher Generationen und Alterationsgrade zu beobachten, wobei in allen Proben immer wieder Anhydritkristalle mit spaltflächenparallelen Kapillaren, z. T. gefüllt mit KW, vorkommen. Darüber hinaus wurden in allen Proben in unterschiedlicher Menge sowohl Karbonat-/Dolomit- wie auch Pyritkristalle nachgewiesen.

Die in den Kornzwickeln oder auf den Korngrenzen befindlichen Fluideinschlüsse (salinare Lösung und/oder KW) konnten ebenfalls sowohl im Q1W wie auch im Q1E beobachtet werden. Die Anzahl und die Zusammensetzung der in den Dünnschliffen beobachteten Fluideinschlüsse hingegen variiert zwischen den Schliffen aus dem Q1W und dem Q1E. Die Proben aus dem Q1W enthalten insgesamt mehr saline Fluideinschlüsse im Bereich von Korngrenzen, Mikrorissen, Spaltflächen und Kornzwickeln als die Proben aus dem Q1E. In den Gesteinen aus dem Q1E kommen Fluideinschlüsse vergleichsweise selten vor, obwohl im Q1E deutlich mehr Rekristallisationszonen in den Bohrkernen zu beobachten sind. Insofern ist anzunehmen, dass das Gestein im Q1E entweder weniger stark mit Fluiden durchsetzt war oder diese während der Halokinese in Kluftspeicher (z. B. anhydritische Gesteine der Leine-Folge) abgepresst wurden.

Neben dem deutlich geringeren Gehalt an salinaren Fluideinschlüssen sind im Q1E auch vergleichsweise selten bräunlich-schwarze KW-führende Fluideinschlüsse zu beobachten. Diese konzentrieren sich überwiegend auf die KW-Bohrung RB669 und deren direktes Umfeld. Vergleichbar intensive und ähnlich großflächige KW-Imprägnationen wie im Q1W konnten im Q1E nicht beobachtet werden. Die Intensität der KW-Imprägnationen und damit der KW-Gehalt hängen vermutlich direkt von der Menge des im Gestein enthaltenen Gesamtinventars an Fluiden (salinare Fluide sowie KW) ab. Möglicherweise repräsentiert das Salzgestein im Bereich des Q1W durch seinen höheren Fluid- bzw. KW-Gehalt ursprünglich tiefere Salzstockpartien, die stärker aufgestiegen sind als das Salzgestein im Q1E, wobei die KW entlang von Störungszonen in das Hauptsalz migrierten und beim Salzaufstieg mitgeschleppt wurden.

In den KW-Bohrungen des Q1W und des Q1E konnten Zonen mit variablen Anhydritgehalten sowie deutlicher Korneinregelung beobachtet werden (siehe auch POPP et al. 2002). Die im Rahmen des Arbeitspaketes vorgesehenen, noch nicht abgeschlossenen gefügekundlich-mikrostrukturellen Untersuchungen sowie die UV-Bohrkerndokumentation bestätigen die in POPP et al. (2002) gemachten Beobachtungen hinsichtlich einer i. d. R. scharfen Abgrenzung zwischen KW-angereicherten und KW-ärmeren Zonen (siehe auch Abb. 10). Die Aussage, dass die KW-ärmeren Zonen oft in Verbindung mit einer Anhydrit-Anreicherung stehen, ist hingegen nicht zu bestätigen. In den KW-Bohrungen aus dem Q1W (siehe HAMMER

et al. 2012), aber auch aus dem Q1E konnten immer wieder Bereiche dokumentiert werden, die trotz eines erhöhten Anhydritgehaltes auch eine KW-bedingte Fluoreszenz aufweisen (Abb. 17). Gelegentlich werden in den Kernen bzw. Schliffen Bruchstücke ehemaliger Anhydritlagen beobachtet, die durch Fluoreszenz Hinweise auf das Vorhandensein von KW liefern. Die in den Bohrkernen beobachteten KW-Schlieren scheinen unabhängig von der mineralogischen Zusammensetzung, d. h. vom Anhydrit-Gehalt des Gesteins zu sein, vielmehr entsprechen sie alten, inzwischen wieder verheilten Bewegungs- bzw. Rekristallisationsbahnen und ihrem unmittelbaren Umfeld.

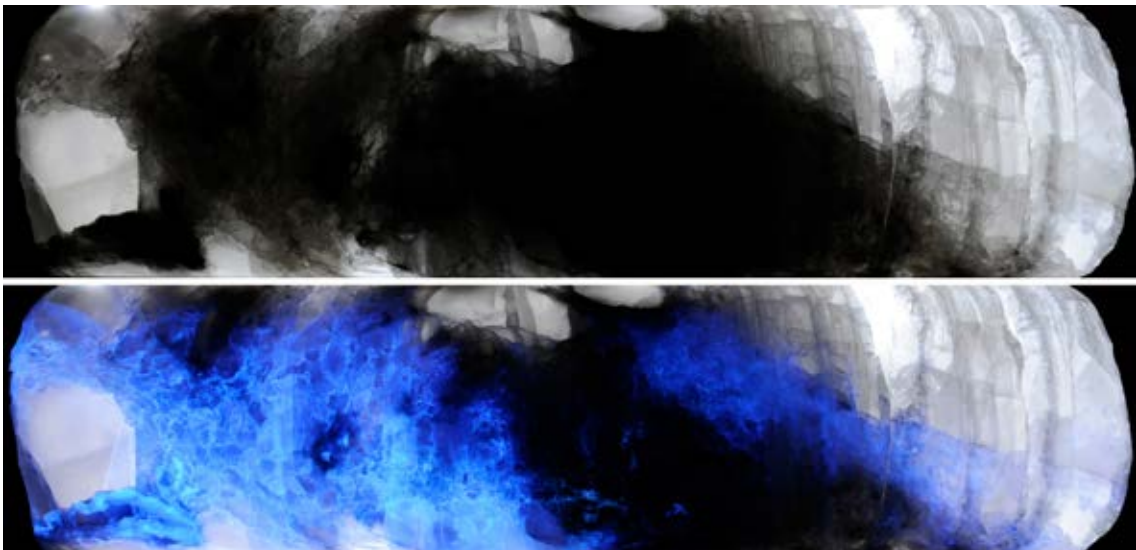


Abb. 17: Kernsegment aus der Bohrung RB648 (Teufe 0,50 m bis 0,76 m) im Durchlicht (oben) und als Kombinationsaufnahme (unten) Durchlicht/UV-Strahlung (254 nm). Anhydritreiche Partien erscheinen schwarz, während weitgehend anhydritfreie Partien transparent bis grau erscheinen. Die im Kernsegment enthaltenen Korngrenzen-KW (cyan) sind im vorliegenden Kernsegment überwiegend an die anhydritreichen Zonen des Bohrkerns gebunden.

In den KW-Kurzbohrungen des Q1W und des Q1E konnte analog zu den Beobachtungen von POPP et al. (2002) eine Einregelung des Korngefüges wie auch der KW-Zonen selbst beobachtet werden. Allerdings konnte die von POPP et al. (2002) getätigte Aussage, dass die KW-imprägnierten Bereiche tendenziell feinkörniger sind, nicht bestätigt werden. Zwar finden sich in den KW-Kurzbohrungen häufig KW-imprägnierte Zonen mit eingeregelt und elongierten Halitkristallen, jedoch ist nur ein sehr geringer Teil dieser Zonen signifikant feinkörniger als die sie umgebenden Gesteinsabschnitte. Bereichsweise enthalten KW-imprägnierte Zonen große Einkristalle von Halit, weisen keine eindeutige Kornorientierung auf oder sind deutlich grobkristalliner als die benachbarten Gesteinspartien. Die Unterschiede in den Beobachtungen sind vermutlich auf die geringe Anzahl von Proben, die POPP et al. (2002) untersuchen konnten, zurückzuführen.

Die im Verlaufe der im Jahr 2012 durchgeführten KW-Untersuchungen erstmalig festgestellte signifikante, gelblich- bis orangefarbene Eigenfluoreszenz einiger Bohrkern- und Streckenabschnitte (Abb. 2 und Abb. 3), sowie die überwiegend auf klare, rekristallisierte Bereiche beschränkten orange-roten Sprenkel stellen Besonderheiten dar, deren Ursache noch nicht abschließend geklärt werden konnte. In ersten Interpretationsansätzen wurde im Hinblick auf die Fluoreszenzfarbe vermutet, dass die in den Dünnschliffen beobachteten, fein dispers verteilten Karbonate/Dolomite die Quelle dieser Fluoreszenz sind und möglicherweise zusammen mit dem ebenfalls fein dispers verteilten Pyritkristallen Produkte einer bereits in den Salinarsedimenten im Zuge der Versenkungsgeschichte abgelaufenen bakteriellen oder thermochemischen Sulfatreduktion sein könnten. Um dieser Vermutung nachzugehen, wurden exemplarische Untersuchungen an durch Salzgesteinsauflösung gewonnenen, unlöslichen Rückständen (überwiegend Tonminerale, Karbonate, Pyrit und Quarz) mittels UV-Strahlung ($\lambda = 254 \text{ nm}$) durchgeführt, sowie Proben von Anhydrit, Karbonat und Pyrit für Isotopenanalysen bereitgestellt, welche gegenwärtig andauern.

Die manuelle Selektion von unter UV-Strahlung fluoreszierender Partikeln aus den unlöslichen Rückständen sowie deren anschließende mikroskopische Untersuchung zeigten, dass es sich bei den gelblich-orange bis orange-rot fluoreszierenden Partikeln ausschließlich um Karbonat-/Dolomitkristalle handelt. Die Unterschiede in der Fluoreszenzfarbe liegen vermutlich in der Karbonatspezies (Dolomit - orange-weiße Fluoreszenz / Calcit – rötliche Fluoreszenz) begründet, was jedoch in weiterführenden röntgenographischen bzw. geochemischen Analysen zu überprüfen ist. Die Ergebnisse aus der Dünnschliffmikroskopie lassen im Hinblick auf die Paragenese vermuten, dass es sich vor allem bei den überwiegend idiomorphen Kristallen entweder um äolischen Eintrag vom Festland, um sedimentär während der Eindunstung des Meerwassers gebildete Kristalle (v.a. Karbonat) oder um Reaktionsprodukte einer bakteriellen bzw. thermochemischen Sulfatreduktion handelt.

4.3 Mikrostrukturelle Studien der Deformationsgefüge von Hauptsalzproben

Im Berichtszeitraum wurden umfangreiche mikrostrukturelle Untersuchungen von KW-führenden und KW-freien Knäuelsalz- und Streifensalzproben aus dem EB 1 durchgeführt. Durch den Einsatz von Subkorngefüge- bzw. Paläopiezometrie-Analysen und EBSD-Messungen wurde der Frage nachgegangen, ob sich die KW-führenden Hauptsalzproben durch mikrostrukturelle Hinweise auf in den Gesteinen abgelaufene spezielle Deformationsprozesse auszeichnen. Außerdem wurde mittels computertomographischer Verfahren der in den KW-reichen Hauptsalzproben vorhandene Fluidspeicherraum dreidimensional visualisiert. Die petrographischen Besonderheiten und die Mikrostrukturen sowie die auf der Basis der 3D-Rekonstruktionen ermittelten Porositäten der KW-führenden Gesteine wurden mit den entsprechenden Angaben für KW-freie Hauptsalzproben verglichen.

4.3.1 Subkorngefüge und Paläopiezometrie

Die 2011 an Proben aus dem Q1W ermittelten Paläodifferentialspannungswerte (siehe HAMMER et al. 2012) wurden durch weitere Auswertungen von geätzten Dickschliffen aus den beiden detailliert untersuchten Querschlügen im Erkundungsbergwerk Gorleben ergänzt.

4.3.1.1 Grundlagen der Subkornpiezometrie

Die Analyse der Subkorngrößen ist eine etablierte Methode zur Spannungsabschätzung in Halitgesteinen (CARTER et al. 1993; FRANSSSEN 1993; SCHLÉDER & URAI 2005). Hierbei ist die Subkorngröße (Durchmesser des Kreisäquivalentes der Subkornfläche) antiproportional zur Differentialspannung (σ' , bzw. $\sigma_1 - \sigma_3$; Abb. 18) und kann nach CARTER et al. (1993) durch folgende Beziehung formuliert werden:

$$D [\mu\text{m}] = 215 \sigma'^{-1,15} [\text{MPa}] \quad (1a)$$

oder

$$\sigma' [\text{MPa}] = 107D^{-0,87} [\mu\text{m}] \quad (1b)$$

mit D = Subkorndurchmesser, σ' = Differentialspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$)

Voraussetzung für die Anwendung dieser funktionalen Abhängigkeit ist, dass die Subkörner im Halit unbeeinflusst von anderen angrenzenden Mineralphasen wie Anhydrit sind (ZULAUF et al. 2010) und einem stationären Deformationszustand zugeordnet werden können (TWISS & MOORES 1992).

Die Subkörner werden in Anlehnung an URAI et al. (1987) durch Anlösen der Schliffoberfläche mit einer untersättigten 5,5-molaren NaCl-Lösung sichtbar gemacht. Das Anätzen des Schliffes erfolgt für etwa 40 Sekunden unter Schwenken der Probe, um ein gleichmäßiges Anlösen der Schliffoberfläche gewährleisten zu können. Anschließend werden die Schliffe mit n-Hexan abgewaschen und mit Druckluft getrocknet.

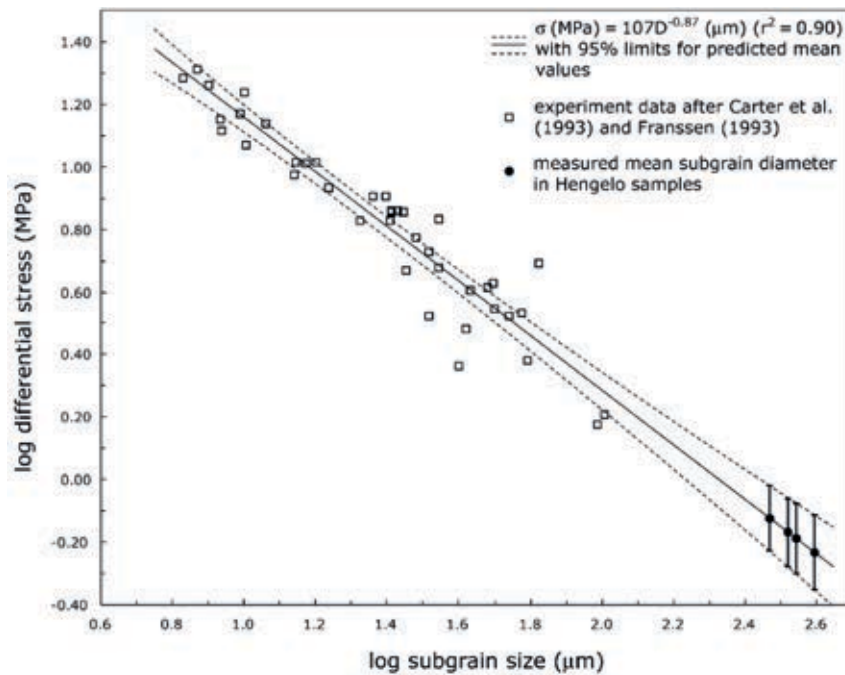


Abb. 18: Invers proportionale Abhängigkeit der Subkorngröße in Halit von der Differentialspannung (aus: SCHLÉDER & URAI 2005).

Die durch das Anätzen im Schliiff sichtbar gemachten Subkörner werden mit Adobe *Illustrator* abgezeichnet und als Subkornmaske im Programm *ImageJ* vermessen. Aus den Subkornflächen werden unter Annahme einer Kreisgeometrie die Korndurchmesser errechnet, die unter Verwendung von Formel 1b die Paläodifferentialspannungen liefern.

Nach CARTER et al. (1993) kann für geringe Spannungswerte und Strainraten folgendes Fließgesetz formuliert werden:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma'^{3.4} \cdot \exp(-Q/R \cdot T \cdot 10^{-3}) \quad (2)$$

$\dot{\epsilon}$ = Strainrate, A = Materialkonstante, σ' = Differentialspannung, Q = Aktivierungsenergie, R = Gaskonstante, T = Temperatur

mit A = $8,1 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-n} \text{ s}^{-1}$, Q = 51,6 kJ/mol, R = 8,31451 J/K·mol, T = 423,15 K

Unter Verwendung der aus den Subkorngrößen errechneten Paläodifferentialspannungen kann somit eine Einschätzung der Strainraten erfolgen, die bei der Verformung von Steinsalzproben herrschten.

4.3.1.2 Beschreibung der Subkorngefüge

Im Rahmen der bisher durchgeführten Erkundungsarbeiten wurden mehrere Proben des Knäuel- und Streifensalzes aus dem Q1W auf ihre Subkorngefüge hin untersucht (Abb. 19).

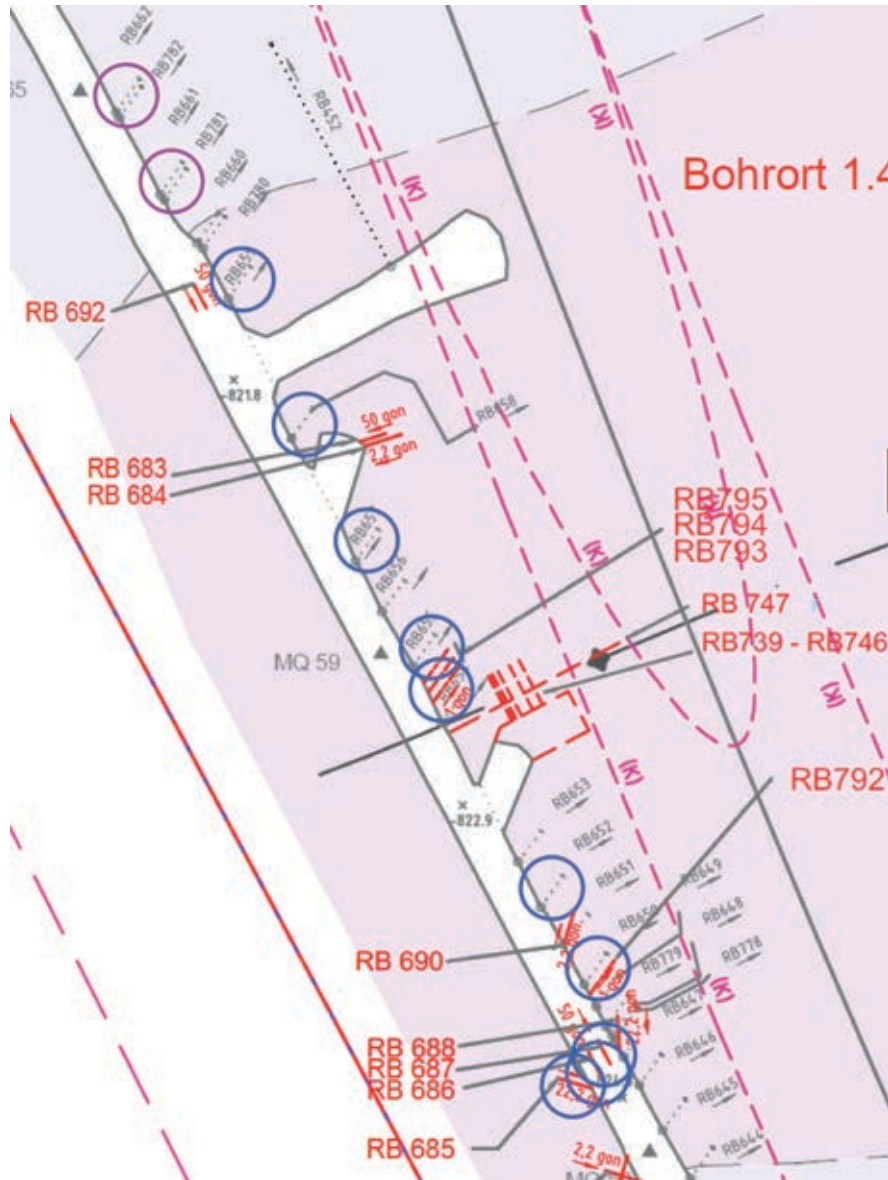


Abb. 19: Lokationen der zur Bestimmung der Paläodifferentialspannungen ausgewählten Bohrkerne im Knäuel- (blaue Kreise) und Streifensalz (violette Kreise) entlang von Q1W (HAMMER et al. 2012).

Die angeätzten Dickschliffe der Proben sind durch ein vielfältiges Inventar an Subkorngefügen charakterisiert. Abb. 20 zeigt eine Auswahl von verschiedenen charakteristischen Mustern, die alle kristallplastische Deformation bezeugen.

Bei der Auswahl der Halitkörner zur Bestimmung der Paläodifferentialspannung dürfen nur Subkorngefüge aus Halitkristallen verwendet werden, die nicht durch andere Mineralphasen wie Anhydrit beeinflusst sind. Subkörner in direktem Kontakt zu Anhydrit sind aufgrund der dort herrschenden Spannungspeaks kleiner und für die Analyse der Paläodifferentialspannungen nicht geeignet (ZULAUF et al. 2010).

Die Knäuelsalz-Probe RB662.019_2s weist ein deutliches Subkorngefüge auf, das im Schliff richtungsabhängig akzentuiert erscheint (Abb. 20B). An Großwinkelkorn Grenzen können Subkörner deutlich kleiner entwickelt sein als im Inneren der Halitkristalle, was zu einer bimodalen Verteilung führt (Abb. 20C). Des Weiteren wurden undulierende Substrukturen innerhalb der Subkörner erkannt, bei denen es sich eventuell um slip lines handelt (Abb. 20D).

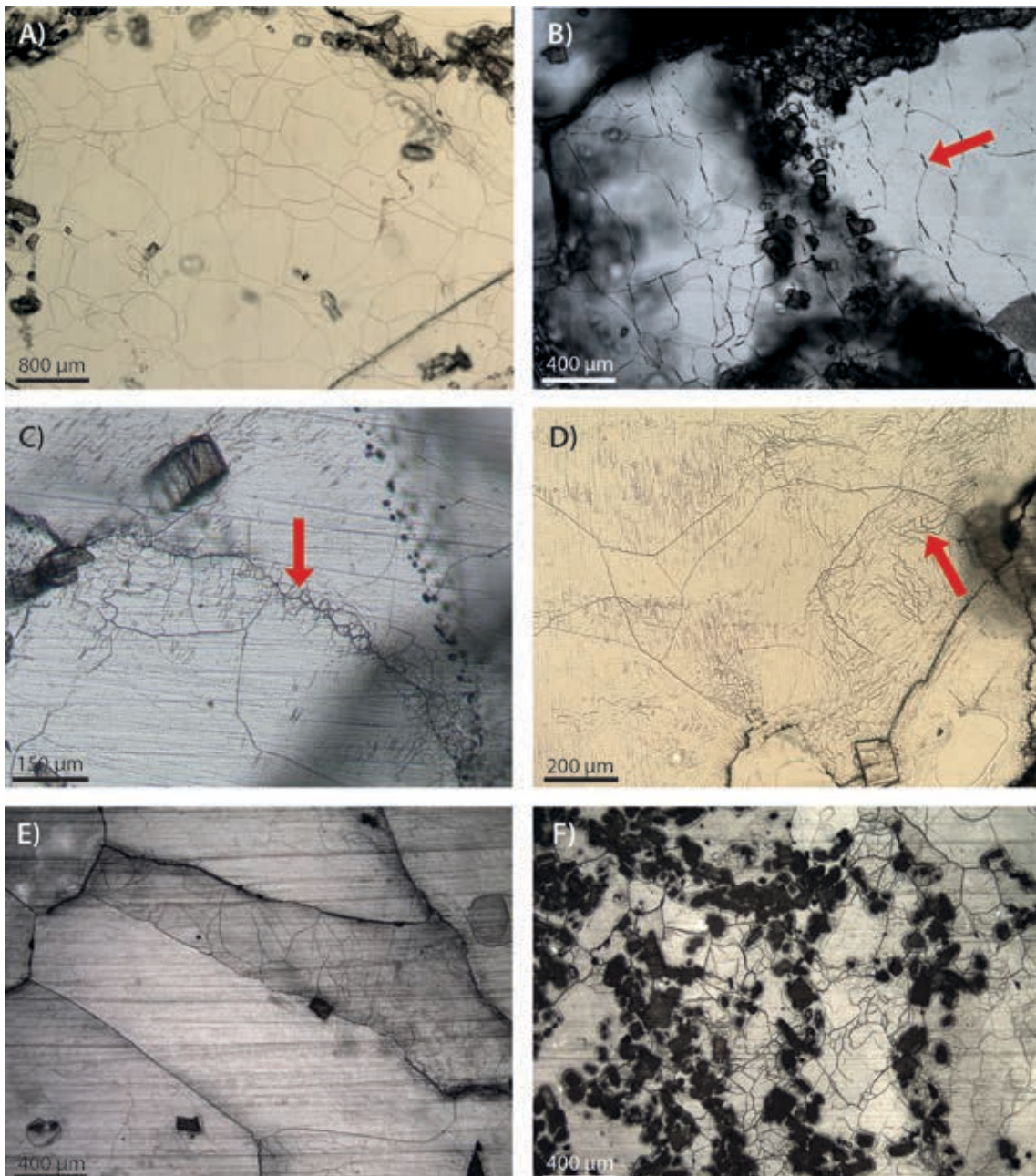


Abb. 20: Charakteristische Subkorngefüge der untersuchten Knäuel- und Streifensalzproben aus dem Q1W. Alle Aufnahmen unter parallelen Nicols, A) bis E) im Durchlicht, Aufnahme F) bei Aufsicht (Photos: N. Thiemeyer).

A) Klassisches Subkorngefüge mit relativ einheitlichen Korngrößen; Probe: RB650.018_2b.
 B) Subkörner mit deutlich ausgeprägten Kanten, die einer leichten Vorzugsorientierung folgen (siehe Pfeil); Probe: RB662.019_2b.
 C) Entlang einer Suture formen sich kleine Subkörner (siehe Pfeil), die eine bimodale Größenverteilung zur Folge haben; Probe: RB658.013_2s.
 D) Innerhalb einiger Subkörner kommen substrukturelle Deformationsspuren (eventuell slip lines) vor (siehe Pfeil); Probe: RB652.015.
 E) Benachbarte Halitkristalle mit unterschiedlich ausgeprägtem Subkorngefüge, bedingt durch statische Rekristallisation oder unterschiedliche Kristallorientierung; Probe: RB686.005.
 F) Subkorngefüge im Umfeld von Anhydriteinschlüssen. Die Subkörner sind deutlich kleiner und zur Paläopiezometrie nicht zu verwenden; Probe: RB686.005.

Subkorgrenzen können unterschiedlich deutlich ausgeprägt sein, was nicht nur mit dem Grad der Deformation und der Bewegung entlang von Versetzungen innerhalb des Halits zusammenhängen muss. Die Orientierung der Halitkristalle und der Grad der Ätzung durch die fast gesättigte NaCl-Lösung können ebenfalls lokale Unterschiede in der Subkornausprägung bedingen. Für die Probe RB686.005 (Abb. 20E) kann z. B. nicht geklärt werden, ob die unterschiedlichen Subkorngefüge der Halitkristalle durch die Kristallorientierung bedingt sind oder durch statische Rekristallisation des scheinbar subkornfreien Halitkorns.

Durch Anhydriteinschlüsse geprägte Gesteinsbereiche (Abb. 20F) zeigen sehr deutlich eine Abnahme der Subkorngrößen aufgrund von Spannungspeaks bei der Deformation im Vergleich zu Subkörnern innerhalb reiner Halitkristalle (Abb. 20A).

4.3.1.3 Ergebnisse der paläopiezometrischen Analysen

Tab. 1 zeigt alle bis zum jetzigen Zeitpunkt für die halitischen Gesteine aus dem Q1W ermittelten paläopiezometrischen Daten. Die berechneten Paläodifferentialspannungen und Strainraten sind in sich konsistent und realistisch für natürlich deformiertes Steinsalz (URAI & SPIERS 2007). Aufgrund der relativ großen Standardabweichungen sind zusätzlich die Wertebereiche der mittleren Spannungen für 95%ige Konfidenz angegeben.

Tab. 1: Paläopiezometrische Daten von Hauptsalzproben aus dem Q1W (Knäuelsalz, z2HS1 – blau; Streifensalz, z2HS2 – violett; Std.-Abw. - Standardabweichung).

Probe	Anzahl der Subkörner	Mittlerer Subkorn-Durchmesser [µm]	Std.-Abw.	Mittlere Paläodifferential-Spannung σ' [MPa]	Paläodifferential-Spannung σ' (95% confidence) [MPa]	Strainrate [s ⁻¹] bei T = 100 °C
RB655.009	545	182	151	1.16	1.04 - 1.31	8.02E-12
RB655.009s	694	180	157	1.17	1.04 - 1.33	8.26E-12
RB658.013_2	694	180	157	1.17	1.04 - 1.33	8.26E-12
RB658.013_2s	344	113	101	1.76	1.56 - 2.02	3.31E-11
RB659.015_1	327	201	193	1.06	0.94 - 1.23	5.90E-12
RB659.015_1s	260	225	199	0.96	0.85 - 1.10	4.22E-12
RB659.017	423	181	159	1.16	1.04 - 1.33	8.02E-12
RB659.017s	627	231	215	0.94	0.83 - 1.08	3.92E-12
RB661.006	403	123	119	1.62	1.43 - 1.88	2.50E-11
RB661.006s	657	167	139	1.25	1.12 - 1.42	1.03E-11
RB662.019_2b	500	126	112	1.59	1.42 - 1.82	2.34E-11
RB650.018_2b	364	198	184	1.08	0.95 - 1.24	6.29E-12
RB654.010	363	199	187	1.07	0.95 - 1.24	6.10E-12
RB652.015	145	270	199	0.82	0.74 - 0.92	2.47E-12
RB657.008	164	160	115	1.19	1.09 - 1.31	8.75E-12
RB685.004_CT	829	163	163	1.27	1.20 - 1.35	1.09E-11
RB686.005_CT	379	221	205	0.97	0.90 - 1.06	4.37E-12
RB687.005_CT	435	160	155	1.29	1.20 - 1.40	1.15E-11

Abb. 21 zeigt die mittleren Paläodifferentialspannungen der untersuchten Hauptsalzproben getrennt für die Einheiten Knäuelsalz (z2HS1) und Streifensalz (z2HS2). Bis auf Probe RB658.013_2s stimmen für alle Knäuelsalzproben (blau) die Spannungswerte sehr gut überein und sind relativ gering. Die drei Proben aus dem Streifensalz (violett) zeigen eine Tendenz zu leicht erhöhten Spannungen. Eine Korrelation zwischen dem KW-Gehalt der Hauptsalzproben und den berechneten Paläodifferentialspannungen bzw. der struktureologischen Position der Proben im Internbau des Salzstocks ist bisher nicht zu erkennen.

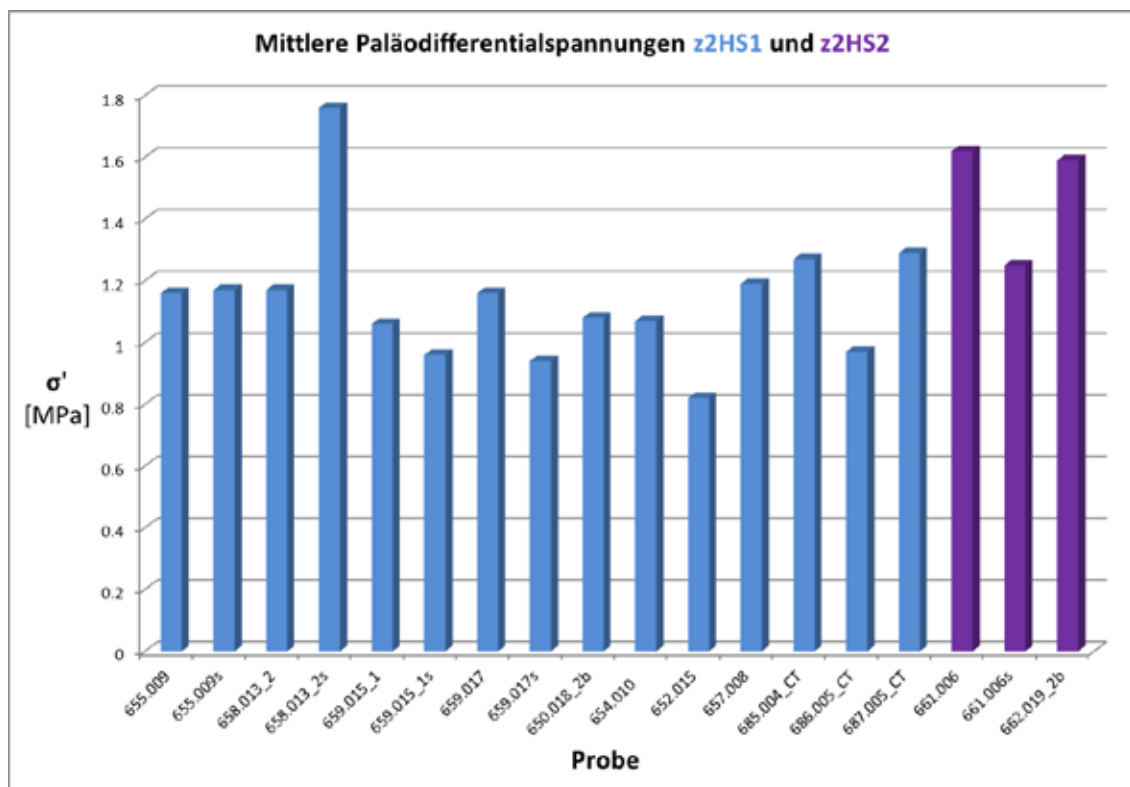


Abb. 21: Die mittleren Paläodifferentialspannungen der Knäuelsalzproben (z2HS1, blau) stimmen bis auf einen Ausreißer gut überein. Bei den drei Proben aus dem Streifensalz (z2HS2, violett) deutet sich eine Tendenz zu leicht höheren Werten an.

4.3.1.4 Diskussion

Die in den Hauptsalzproben aus dem Salzstock Gorleben beschriebenen Muster und Formen der Subkorngefüge unterscheiden sich durch ihre Variabilität von Subkorngefügen experimentell deformierter Proben (siehe FRANSSSEN 1994; ZULAUF et al. 2010). Dies liegt zum einen an den Anhydriteinschlüssen innerhalb der Halitmatrix in natürlichen Gesteinsproben, zum anderen vermutlich an einer komplexeren Deformationshistorie. Bei Berücksichtigung der Ergebnisse von EBSD-Messungen (siehe Kap. 4.3.2) zeigt sich, dass wahrscheinlich Kombinationen unterschiedlicher Deformationsmechanismen wie Versetzungsbewegungen,

Lösungs-Fällungs-Kriechen und fluidunterstützte dynamische Rekristallisation gewirkt haben. Ähnliche Prozesse haben URAI et al. (1987), SCHLÉDER & URAI (2005) und URAI & SPIERS (2007) beschrieben. Die Frage, ob es sich bei scheinbar subkornfreien Halitkristallen um Neuwachstum handelt, kann nur unter Verwendung der EBSD-Methode geklärt werden. Dadurch kann ebenso festgestellt werden, ob die Deutlichkeit der Subkornstrukturen mit einer Zunahme der Deformationsintensität einhergeht.

Die vermutete Tendenz zu leicht höheren Spannungen im Streifensalz ist aufgrund von nur drei analysierten Proben bislang statistisch noch nicht aussagekräftig genug. Eine Tendenz zur Änderung der Paläodifferentialspannungen in Abhängigkeit von der räumlichen Lage der Knäuelsalzproben im Q1W ist nicht erkennbar.

4.3.2 Untersuchungen von Knäuelsalz- und Streifensalzproben mittels electron backscatter diffraction

Die Methode der *electron backscatter diffraction (EBSD)* stellt eine Möglichkeit dar, Kristallorientierungen (Texturen) in Dick- oder Dünnschliffen zu analysieren (PASSCHIER & TROUW 2005 und darin enthaltene Literatur). Mit den mineralspezifischen Mustern der zurückgestreuten Elektronen (*electron backscatter patterns; EBSP*) wird die Kristallsymmetrie jedes beliebigen Minerals entschlüsselt. Hierbei können Punktmessungen oder sogenannte *mappings* durchgeführt werden, wobei letztere durch automatisiertes Abrastern großer Bereiche der zu analysierenden Minerale entstehen.

4.3.2.1 Grundlagen und Prinzip von EBSD-Messungen an Salzgesteinen

EBSD-Analysen an Salzgesteinen werden in den Geowissenschaften breit genutzt (PENNOCK et al. 2002; BESTMANN et al. 2005; SCHLÉDER & URAI 2007; DESBOIS et al. 2010). In Bezug auf Salzgesteine ist die Methode dazu prädestiniert, verschiedene Deformationsmechanismen und den Grad der Rekristallisation von Halitkristallen zu bestimmen.

Ein bekannter Deformationsmechanismus für Steinsalz ist die Subkornrotations-Rekristallisation (*subgrain rotation (SGR) recrystallization*, PASSCHIER & TROUW 2005, siehe Abb. 22). Bei diesem Verformungsprozess beginnen einzelne Körner des Subkorngefüges bei angelegtem Strain zu rotieren, bis aus der Subkorngrenze eine Großwinkelkorngrenze entsteht. Verbiegungen des Kristallgitters, Subkornrenzverläufe und der Rotationsbetrag einzelner Körner zueinander können durch die EBSD-Methode detailliert ermittelt werden.

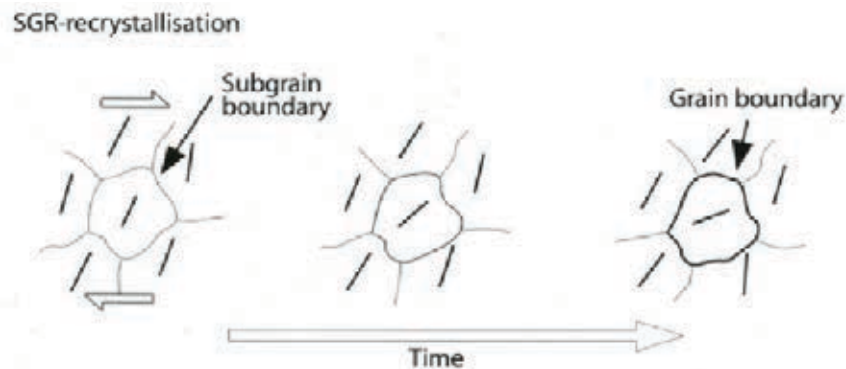


Abb. 22: Prinzip der Subkornrotations-Rekristallisation (PASSCHIER & TROUW 2005). Die Linien innerhalb der Kristalle bilden die Kristallgitterorientierung ab. Subkorn Grenzen entwickeln sich durch Rotation der Subkörner zu Großwinkelkorn Grenzen.

4.3.2.2 Probenpräparation

Die EBSD-Analysen werden an geätzten Dickschliffen der Steinsalzproben durchgeführt. Nicht-geätzte Schiffe können aufgrund der Schleifspuren und der Mikrodeformation der Salzoberfläche (Abb. 23) nicht verwendet werden. Die Dickschliffe werden unter Vakuum mit Kohlenstoff bedampft, um eventuelle Aufladungen der Salzproben im Raster-elektronenmikroskop (REM) zu verhindern. Zusätzlich werden die Schiffe und der Probenhalter mit Kupferband verbunden, um elektrostatische Aufladungen ableiten zu können.

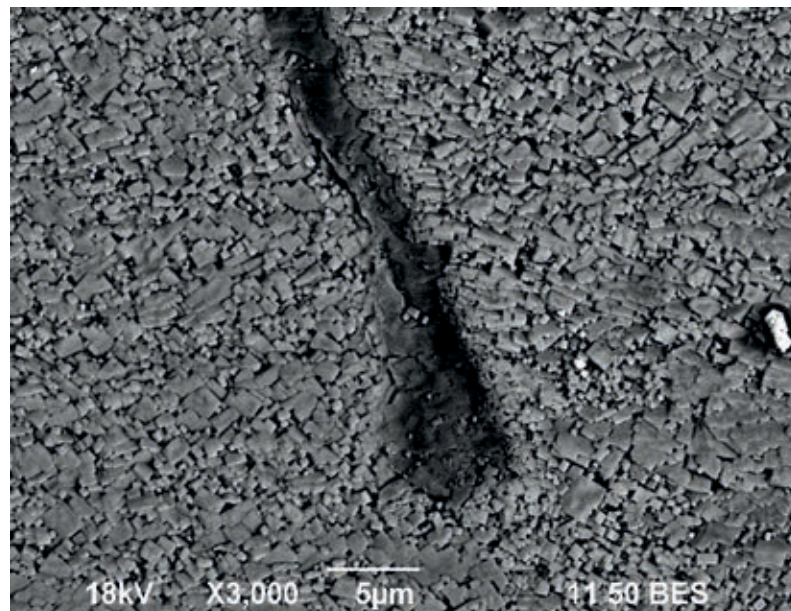


Abb. 23: Die REM-Aufnahme (Rückstreuerelektronenbild, BES) der Probe RB655.016_2 zeigt eine präparationsbedingt stark deformierte Oberfläche des Halitkristalls. EBSD-Aufnahmen können deshalb nur an geätzten Salzschliffen durchgeführt werden. Die dunkle Struktur (Bildmitte) zeigt einen Fluideinschluss entlang einer Korngrenze (Photo: N. Thiemeyer).

4.3.2.3 Analysenverfahren und Visualisierung der Untersuchungsergebnisse

Die Proben werden im REM auf einen speziellen Probenhalter im 70°-Winkel zum EBSD-Detektor mit einem Arbeitsabstand von 20 mm zum Elektronenstrahl montiert. Die EBSD-Messungen wurden mittels REM (*JEOL JSM-6490*) bei 15 kV mit der Software *CHANNEL 5* (*HKL Technologies, Oxford Instruments*) durchgeführt. Hierbei werden rechteckige EBSD-Maps erstellt (*mappings*), die durch automatisches Abrastern des gewünschten Probenbereiches in definierten Schritten von 4 bis 6 µm generiert werden und die Orientierung der Halit- und Anhydritkristalle in IPF-Farben (*inverse pole figure*) darstellen. Die Maps sind durch die Kippung der Probe geometrisch nicht exakt mit den entsprechenden Ausschnitten im Schliff zu vergleichen und erscheinen gestaucht. Über die Software *CHANNEL 5* können zusätzlich Polfiguren (Raumlage und Dichtedarstellung) und Missorientierungshistogramme von definierten Profilen visualisiert werden. Die Histogramme zeigen Verbiegungsgrad und -richtung über den entsprechenden Profilverlauf. Die generierten Maps werden mit systeminternen Filtern von fehlerhaften Pixeln und Artefakten befreit. Über die Orientierung jedes Messpunktes können (Sub-)Korngrenzen erkannt und klassifiziert werden, die Aufschluss über den Deformationszustand bzw. die Rekristallisationsprozesse der jeweiligen Probe geben können.

4.3.2.4 Ergebnisse der EBSD-Analysen

Insgesamt wurden bisher an drei Proben des Knäuelsalzes (RB658.013_2s, RB655.009_s, RB659.015_1s) und an einer Probe des Streifensalzes (RB662.019_2b) EBSD-Analysen durchgeführt. Die Untersuchungen liefern verschiedene mikrostrukturelle Ergebnisse in Bezug auf Deformations- und Rekristallisationsprozesse der Salzgesteine.

Die Streifensalzprobe RB662.019_2b aus dem nördlichen Bereich der im Q1W aufgeschlossenen Sattelstruktur zeigt teils sehr deutlich entwickelte Subkorngefüge im Dickschliff (Abb. 24).

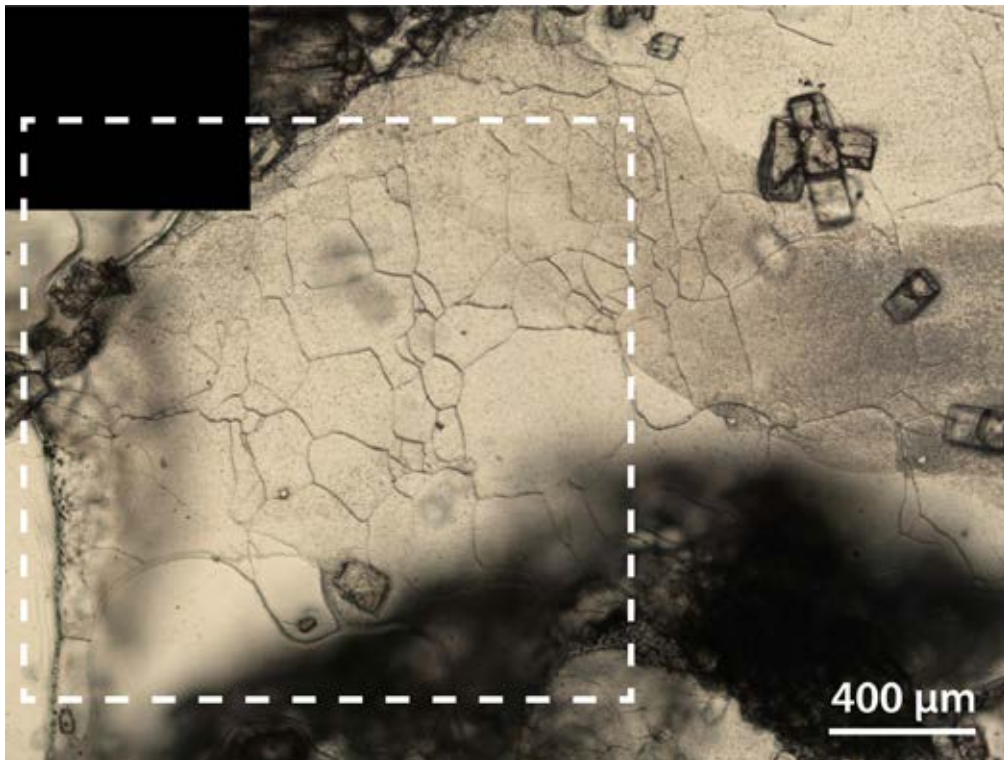


Abb. 24: Deutlich ausgebildetes Subkorngefüge in der Probe RB662.019_2b. Der weiße Rahmen entspricht dem Ausschnitt der EBSD-Map in Abb. 25. Aufnahme unter Aufsicht (Photo: N. Thiemeyer).

Die EBSD-Map (Abb. 25) detektiert fast keine der beobachteten Subkorgrenzen, was einer sehr geringen Rotation der einzelnen Subkörner entspricht. Das Missorientierungsprofil zeigt Rotationswinkel zwischen 1° und 2° für die vom Profil durchkreuzten Subkorgrenzen, die im Missorientierungshistogramm als sprunghafte Anstiege zu erkennen sind. Über die Profillänge von knapp 1,5 mm zeigt sich ansonsten eine schwache Biegung des Kristallgitters von knapp 6° .

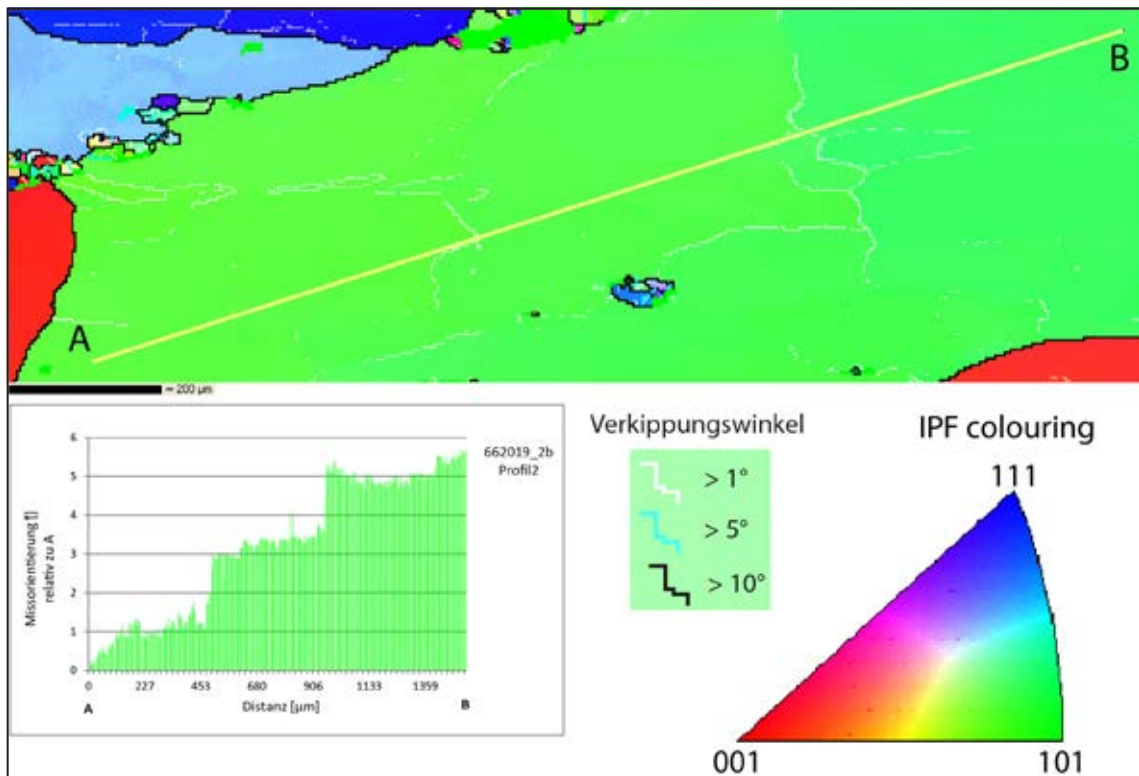


Abb. 25: EBSD-Map der Probe RB662.019_2b. Die unterschiedlichen Farben zeigen die Orientierungen der einzelnen Halitkristalle zueinander. Innerhalb des größten Kristalls (grün) sind nur sehr wenige Subkorngrenzen (weiß) aufgrund von geringer Kornrotation erfasst worden. Die rotierten Subkörner sind nur um etwa 2° gegeneinander verkippt (siehe Sprünge im Misorientierungshistogramm). Über das Profil A-B lässt sich eine Biegung des Halitkristalls von knapp 6° erkennen.

Die EBSD-Analyse für die Knäuelsalzprobe RB655.009_s wurde in einem Halit-Großkristall durchgeführt und besteht aus vier Einzelmessungen, die manuell aneinander gefügt wurden (Abb. 26). An diesem Beispiel lässt sich die Klassifizierung von Subkorngrenzen klar verdeutlichen. Mit CHANNEL 5 können viele der im Schliff erkennbaren Subkörner aufgrund ihrer Rotation gegeneinander erkannt werden. Die Subkorngrenzen sind je nach Verkipfungswinkel in verschiedenen Farben dargestellt (siehe Abb. 25 rechte Hälfte unten bzw. Abb. 26 rechte Bildhälfte mittig). Der Grad der Subkornrotation ist deutlich stärker ausgeprägt als bei der Probe RB662.019_2b (siehe Abb. 25). Im Einzelfall ist ein Verkipfungswinkel > 10° vorhanden.

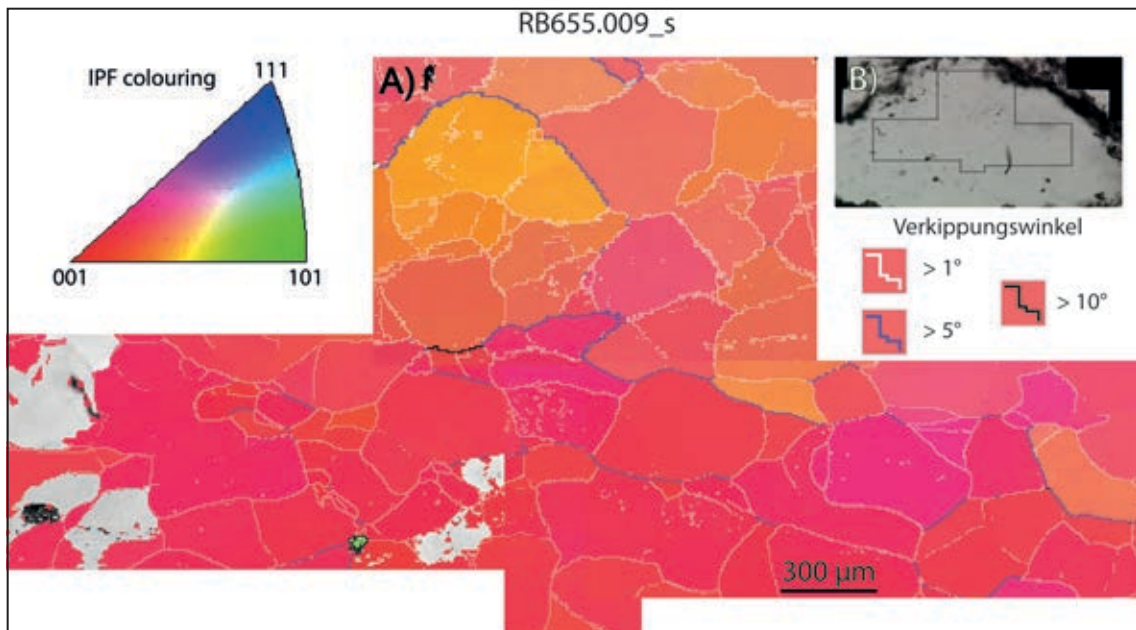


Abb. 26: A) EBSD-Map aus vier Einzelmessungen innerhalb eines Halitgroßkristalls der Probe RB655.009_s. Es ist eine Rotation einzelner Subkörner von bis zu $> 10^\circ$ erkennbar (schwarze Grenze, Bildmitte). Die grauen Bereiche stellen Messpunkte ohne Ergebnis dar.
 B) Anordnung der EBSD-Map innerhalb des Halitgroßkristalls im Dickschliff.

Die EBSD-Analyse der Knäuelsalzprobe RB685.013_2s (Abb. 27) wurde durchgeführt, um mikrostrukturelle Unterschiede benachbarter Halitkörner zu überprüfen. Grund hierfür ist der suturierte und gebogene Korngrenzenverlauf. Beide Halitkörner scheinen frei von rotierten Subkörnern zu sein. In der EBSD-Map können nur punktuelle, sehr geringe Missorientierungen im Bereich von 1° erkannt werden. Das rechte der beiden Körner zeigt scheinbar mehr Missorientierungen als das linke. Einige horizontal verlaufende Aneinanderreihungen von Missorientierungen sind präparationsbedingte Artefakte, die bei der Ätzung der Probe nicht entfernt wurden.

Die Missorientierungsprofile beider Halitkörner unterscheiden sich in Bezug auf die Biegungscharakteristik der Kristallgitter. Profil A-B zeigt eine etwa kontinuierliche Biegung bis zu insgesamt $> 4^\circ$ relativ zu Punkt A, erkennbar an der Stetigkeit des Missorientierungshistogramms. Gegensätzlich dazu ist bei Profil C-D eine variierende Missorientierung in verschiedene Richtungen zu erkennen. Die Biegung des rechten Halitkorns verläuft somit nicht immer in die gleiche Richtung und variiert zudem stärker auf einer kürzeren Distanz, erkennbar durch das Steigen und Fallen der Missorientierungswinkel relativ zu C. Beide Halitkörner unterscheiden sich demnach in der Verbiegung ihres Kristallgitters, zeigen aber beide keine Subkorn Grenzen.

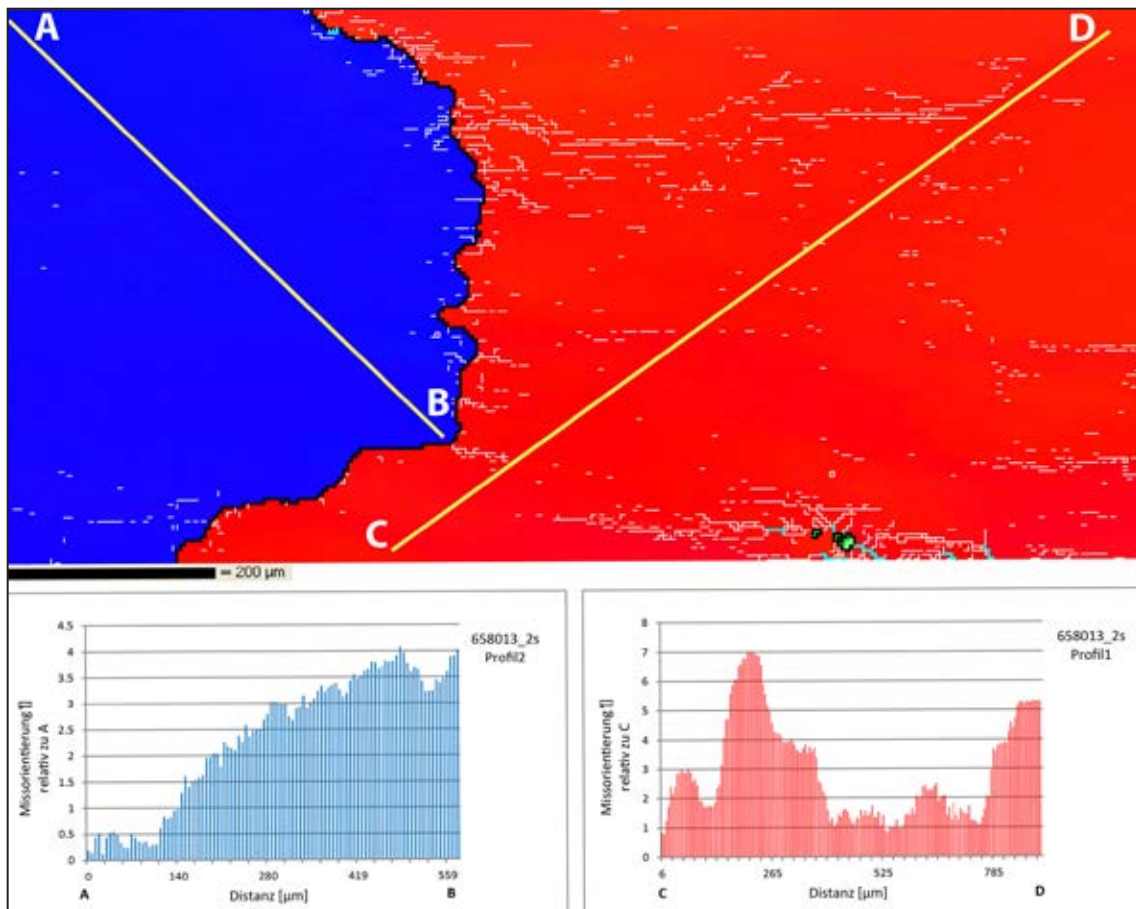


Abb. 27: EBSD-Map der Probe RB658.013_2s. Die beiden Halitkristalle zeigen eine unterschiedliche Anzahl an kleinen Missorientierungen sowie unterschiedliche Biegungscharakteristika ihrer Kristallgitter. Profil A-B zeigt eine stetige, gerichtete Biegung, Profil C-D hingegen in der Richtung variierende und stärker entwickelte Verkippungen der Gitterstruktur.

Die EBSD-Map für die Knäuelsalzprobe RB659.015_1s zeigt klar entwickelte Subkornmuster, was anhand der Stufenmuster der beiden Missorientierungshistogramme deutlich sichtbar wird (Abb. 28). Die Besonderheit dieser EBSD-Messung liegt darin, dass ein einzelnes Subkorn mit bis zu 28° im Vergleich zu den umgebenden Körnern rotiert ist und dem klassischen Fall der Subkornrotations-Rekristallisation entspricht. Die frühere Subkornengrenze hat sich somit zu einer Großwinkel-Korngrenze entwickelt.

Die Polfiguren (Abb. 28B) zeigen ebenso die mikrostrukturellen Orientierungscharakteristika von RB659.015_1s. Die Streuung der blauen Datenpunkte (Abb. 28B) veranschaulicht die Biegung und leichte Rotation der Subkörner des größeren Halitkristalls (blau). Das darin enthaltene deutlich rotierte Korn (grün) ist im Polfiguren-Plot (Abb. 28B) separiert und sogar in der Dichteverteilung der Messpunkte (Abb. 28C) erkennbar.

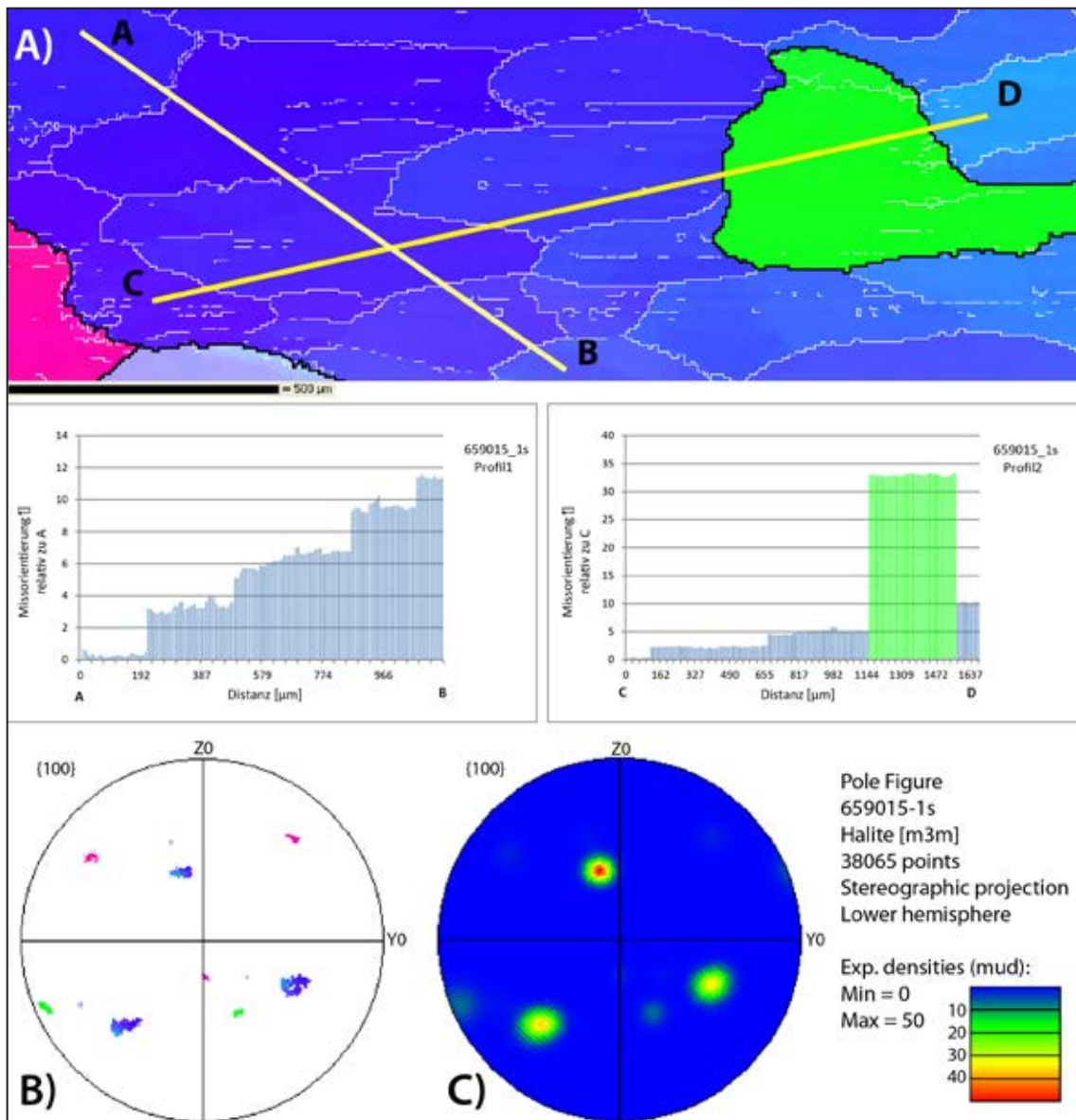


Abb. 28: A) Die EBSD-Map für die Probe RB659.015_1s ist durch ein deutlich rotiertes (ehemaliges) Subkorn charakterisiert, das mit bis zu 28° gegenüber seiner Umgebung rotiert ist (siehe Profil C-D). Die restlichen Rotationswinkel der Subkörner schwanken zwischen 2-3°. B) Der Polfiguren-Plot visualisiert das stark rotierte Korn neben den anderen Halitkristallen in seiner Raumlage. Das Streuen der blauen Datenpunkte verdeutlicht die klare Verbiegung des Halitkorns um bis zu mehr als 10°. C) Der Punktdichte-Plot der EBSD-Messung stellt abhängig von der Datenpunktverteilung die Orientierungsschwerpunkte dar. Das rotierte Korn ist hier ebenfalls erkennbar.

Im Dickschliff der Probe RB659-015_1s lassen sich keine Anhaltspunkte für eine solch starke Rotation des Korns innerhalb des Subkornverbandes feststellen (Abb. 29). Dieses Fallbeispiel zeigt anschaulich die besseren Möglichkeiten der EBSD-Methode, Kristallgitterdeformationen und Texturen detaillierter als andere Methoden entschlüsseln zu können.

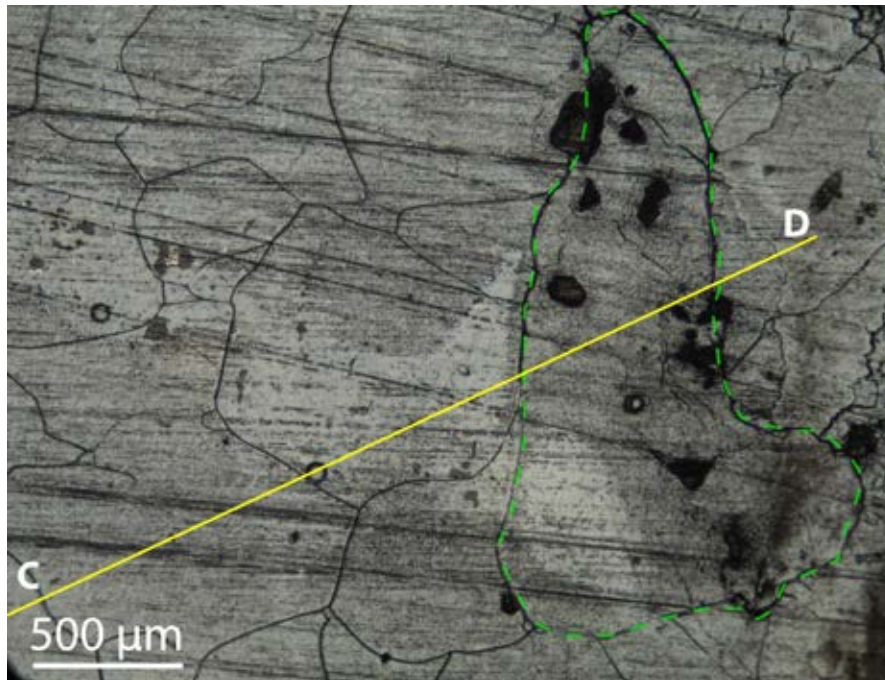


Abb. 29: Ausschnitt aus der in Abb. 28 dargestellten EBSD-Map für die Probe RB659.015_1s mit Profil C-D. Die Kornformen stimmen verzerrungsbedingt nicht exakt mit jenen der EBSD-Map überein. Das stärker rotierte Korn (grüne Umrahmung) hebt sich optisch nicht vom restlichen Subkornverband ab. Die Korngrenze zeigt ebenfalls keine auffälligen Merkmale. Für Großwinkelkorngrenzen typische Fluiddekorationen fehlen (Photo: N. Thiemeyer).

4.3.2.5 Diskussion

Beim Vergleich der mikroskopischen Subkorngefüge mit den EBSD-Mustern der Hauptsalzproben aus dem Salzstock Gorleben zeigt sich, dass mit der EBSD-Methode nicht alle Subkörner aufgelöst werden können. Die EBSD-Methode kommt an ihre Grenzen, wenn die Subkörner nur sehr gering oder gar nicht rotiert sind. In Extremfällen wie bei der Probe RB662.019_2b sind im Dickschliff unter dem Lichtmikroskop deutliche Subkorngefüge erkennbar, während mittels EBSD-Analysen fast keine Rotation feststellbar ist. Das Kristallgitter wurde demnach durchaus kristallplastisch deformiert, da eine Gitterverbiegung zu erkennen ist. Allerdings scheinen andere Deformationsmechanismen als die Subkornrotations-Rekristallisation dominant gewesen zu sein.

Nach derzeitigem Stand der Untersuchungen unterscheidet sich das Streifensalz bezüglich der Deformationsmechanismen vom Knäuelsalz. Zwei der drei untersuchten Knäuelsalzproben zeigen eine Rotation der Subkörner. Die Probe RB655.009_s beinhaltet zahlreiche gegeneinander verkippte Subkörner, die in einem Fall sogar mehr als 10° gegeneinander rotiert sind.

Die Probe RB659.015_1s muss in diesem Zusammenhang als besondere Probe herausgestellt werden. Möglicherweise ist das EBSD-Muster mit einem einzelnen, stark rotierten Korn eine neue Beobachtung, die in dieser Form für natürlich deformiertes Steinsalz noch nicht beschrieben wurde. Eventuell könnte die interne Strainenergie des gesamten Halitkristalls in die Rotation eines Subkorns übertragen und freigesetzt worden sein, sodass andere Bereiche nur unwesentlich deformiert wurden. Ein anderer Erklärungsansatz besteht darin, dass einmal in Rotation versetzte Körner bei anhaltendem Strain tendenziell weiter rotieren, ohne dass andere Subkörner in Rotation versetzt werden. Diese Möglichkeit ist gleichbedeutend mit der Annahme einer Aktivierungsenergie oder Schwellenenergie zur Subkornrotation, die aufgebracht werden muss. Dem gilt es durch weitere Analysen nachzugehen.

Es fällt auf, dass die Probe RB659.015_1s unter dem Fluoreszenzmikroskop den höchsten KW-Gehalt aller mit EBSD untersuchten Proben aufweist. Möglicherweise könnten erhöhte KW-Gehalte Deformationsmechanismen wie Korngrenzenmigration oder Lösungs-Fällungs-Kriechen behindern und die Bedingungen für Subkornrotations-Rekristallisation verbessern. Umgekehrt könnten von Subkornrotation betroffene Bereiche einen höheren bzw. anderen Grad an Deformation des Salzgesteins ausdrücken und hiermit eine mögliche Erklärung für die erhöhten KW-Gehalte liefern. Diese beiden Möglichkeiten sind zum jetzigen Zeitpunkt der Analysen nicht eindeutig zu verifizieren und müssen durch weitere Untersuchungen ergänzt und überprüft werden.

Die EBSD-Map für die Probe RB658.013_2s könnte Anzeichen für Korngrenzenmigration liefern, wobei ein Kristall auf Kosten des mit höherer interner Strainenergie versehenen anderen Kristalls in letzteren hineingewachsen zu sein scheint. Dass beide Körner verschieden stark deformiert sind, kann durch das unterschiedliche Vorkommen von Missorientierungen und die nachgewiesenen Differenzen in den Gitterverbiegungen vermutet werden. Als Folge von möglicher Korngrenzenmigration entstehen sodann suturierte Grenzflächen, ähnlich den Strukturen aus dem EBSD-Muster der Probe RB658.013_2s.

Die mittels EBSD-Maps erfassten Kornformen erscheinen im Vergleich zu den entsprechenden Ausschnitten im Schlibbild aufgrund der um 70° gekippten Probe im REM verzerrt. Eventuelle Vorzugsorientierungen oder Kornformanisotropien können daher nur durch die Lichtmikroskopie festgestellt werden.

4.3.3 Computertomographische Untersuchungen von Knäuelsalzproben

Im Rahmen von computertomographischen (CT) Untersuchungen an KW-führenden Hauptsalzproben wurde die Porosität von Knäuelsalzproben aus dem Q1W quantifiziert sowie die räumliche Verteilung des fluidgefüllten Porenraumes in dreidimensionalen Rekonstruktionen dargestellt. Des Weiteren wurden Dickschliffe mit einem Harz imprägniert, um die Mikrostrukturen und die Porenformen genauer betrachten zu können.

4.3.3.1 *Probenvorbereitung und Mess- bzw. Auswerteverfahren*

Zur Quantifizierung und 3D-Visualisierung des fluidgefüllten Porenraumes wurden CT-Aufnahmen von bisher fünf Knäuelsalzproben mit dem Nanofokus-Computertomographen *nanotom s* (GE Sensing, Phoenix|x-ray) durchgeführt. Drei dieser Proben sind durch makroskopisch sichtbare, bis ca. 5 mm große Poren gekennzeichnet (Abb. 30), die sich auf den Außenseiten der KW-führenden Kerne aus den Packerbohrungen erkennen lassen (siehe HAMMER et al. 2012) und mit gelblichen Kondensatrückständen ausgekleidet sein können (RB685.004_CT, RB686.005_CT und RB687.005_CT). Diese Packerbohrungen wurden im Bereich deutlicher KW-Imprägnationen im südlichen Abschnitt des Q1W gestoßen. Das Vorkommen derartiger Poren beschränkt sich im bisher erkundeten Teil des Salzstocks Gorleben auf die KW-führenden Hauptsalz-Bereiche im Zentralteil des Q1W.

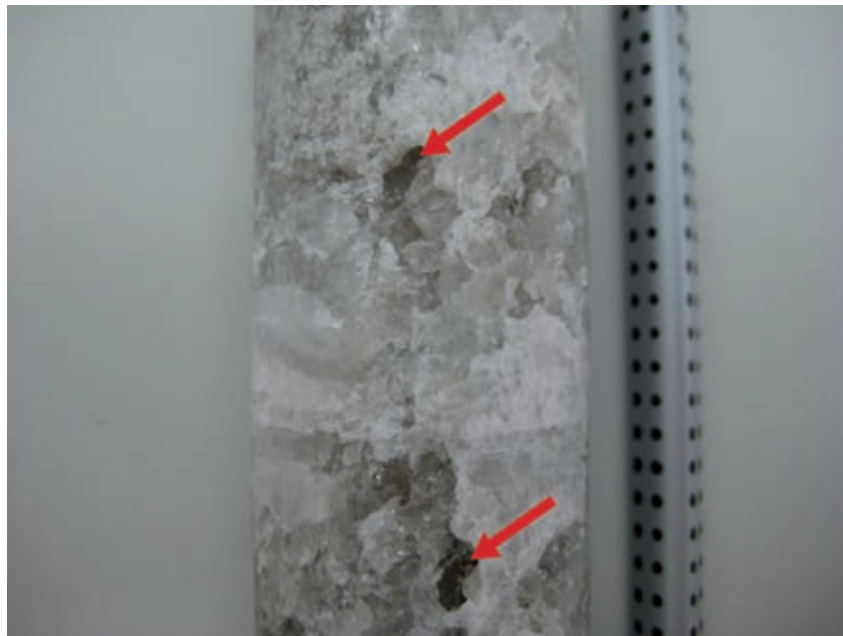


Abb. 30: Kernabschnitt aus der Packerbohrung RB686 mit einem Kerndurchmesser von 28 mm. Die an der Außenseite des Kerns erkennbaren Poren (Pfeile) können mit Kondensat-Rückständen ausgekleidet sein.

Die makroskopisch in wenigen Kernen festgestellte, teilweise erhöhte Porosität des Knäuelsalzes (HAMMER et al. 2012) ist auffällig, da das Knäuelsalz im Salzstock Gorleben, so wie Steinsalz in Salzstöcken generell, durch eine sehr geringe Porosität von deutlich < 1 Vol.-% gekennzeichnet ist (BORNEMANN et al. 2008). Steinsalz wird aufgrund seiner geringen Porosität und Permeabilität als undurchlässig für Gase und Fluide angesehen (BORNEMANN et al. 2008; POPP et al. 2012). Porositäten im Steinsalz sind in der Regel < 1 % (PEACH 1991; STORMONT & DAEMEN 1992, STORMONT 1997).

Die Permeabilität in ungestörtem Steinsalz liegt im Bereich von 10^{-21} m² (SUTHERLAND & CAVE 1980; STORMONT & DAEMEN 1992; STORMONT 1997; DE LAS CUEVAS 1997; BORNEMANN et al. 2008; ALKAN 2009, HAMMER et al. 2012, ZARETZKI et al. 2012).

Die mechanischen Eigenschaften von Salzgestein verhindern eine Konservierung von offenen Rissen oder Wegsamkeiten (POPP et al. 2007). Die Eigenschaft des Selbstverheilens (*self-healing*) des Salzes führt bedingt durch seine hohe Duktilität zu einer Schließung von offenen, durch die Halokinese oder Bergwerksauffahrungen hervorgerufenen Wegsamkeiten (STORMONT & DAEMEN 1992; SCHULZE et al. 2001). Das durch plastisches Kriechen allgegenwärtige Verheilen reduziert die Porosität und Permeabilität und ist irreversibel (STORMONT & DAEMEN 1997). Eine Kompaktion des Steinsalzes unter hydrostatischem Druck wirkt durch Lösung, Wiederausfällung und Rekristallisation der Rissbildung und einer Erhöhung der Porosität und Permeabilität entgegen (SCHULZE 2007).

4.3.3.2 CT-Aufnahmen und Datenverarbeitung

Die Computertomographie ist eine sehr genaue und zerstörungsfreie Methode zur Quantifizierung und Visualisierung von Porenstrukturen. Bei CT-Analysen kann in Kombination mit entsprechender Software jede durch Dichtekontrast unterscheidbare Phase des Objektes visualisiert und quantifiziert werden. Die CT-Technik hat sich auch in den Geowissenschaften etabliert (siehe MEES et al. 2003 und darin enthaltene Literatur; ROTHWELL & RACK 2006).

Das Ziel der CT-Studien liegt in der Visualisierung, Quantifizierung und geometrischen Charakterisierung des fluidgefüllten Porenraumes, speziell in den KW-führenden Hauptsalzproben. Die räumliche Darstellung und die Verteilungsmuster des Porenraumes erlauben Rückschlüsse auf das strukturelle Inventar der Salzproben. Sie geben in Kombination mit mikrostrukturellen Untersuchungen an Dickschliffen einen Erklärungsansatz zu lokal auftretenden, erhöhten Porositäten und liefern damit Hinweise für die Genese der KW-Imprägnation und/oder für mögliche Fluidtransporte.

CT-Studien an Steinsalz sind bisher nur sehr selten zu finden (ZULAUF et al. 2009; BURLIGA & CZECHOWSKI 2010). Von BURLIGA & CZECHOWSKI (2010) wurde die Computertomographie zur Visualisierung und Quantifizierung von Porosität bei der Analyse von KW-führenden Salzgesteinen der Klodawa-Salzstruktur (Polen) angewandt.

Die Porenraumquantifizierung wurde für die Gorlebener Knäuelsalzproben mittels zweier verschiedener Methoden vorgenommen. Grundlage beider Methoden ist das Unterscheiden und Extrahieren der aufgrund von Dichtekontrast und entsprechenden Variationen in den Grauwerten in den CT-Rohdatensätzen abgrenzbaren Volumina.

Die erste Methode bedient sich der Software *VGStudio*. Dieses CT-systeminterne Programm bietet ein Tool zur manuellen Extraktion der gewünschten Volumina (*regions of interest; ROI*). Unter Berücksichtigung einer Grauwerttoleranz erlaubt dieses Tool eine Markierung und Extrahierung der gewünschten Volumina per Mausclick (Abb. 31). Ein geringes Bildrauschen und klare Grauwertkontraste erleichtern dieses Verfahren. Die schrittweise auf mehreren Horizontal- und Vertikalschnittebenen extrahierten Volumina können anschließend als dreidimensionale Projektion visualisiert werden. Die so erzeugten Datensätze beinhalten Angaben wie Voxelanzahl (*Voxel - Volumetric Pixel*, d. h. Datenpunkt einer 3D-Rastergrafik), räumliche Ausdehnung und das absolute Volumen in mm^3 oder als Voxelanzahl. Verschiedene Projektions-Modi dienen zur Veranschaulichung der 3D-Muster. Diese Methode ist sehr zeitaufwändig, bietet jedoch die Möglichkeit, neben den absoluten Porositäten auch die charakteristische räumliche Verteilung des Porenraumes zu entschlüsseln. Verteilungsanisotropien, bevorzugte Orientierungen und die exakte Form einzelner Objekte können detailliert betrachtet werden. Des Weiteren können die 3D-Datensätze in beliebige Richtungen rotiert, angeschnitten oder vergrößert werden. Durch *VGStudio* oder durch Freeware-Software können Videos der rotierenden Porositätsmuster oder selbstgewählte Bewegungslinien in den 3D-Projektionen generiert werden.

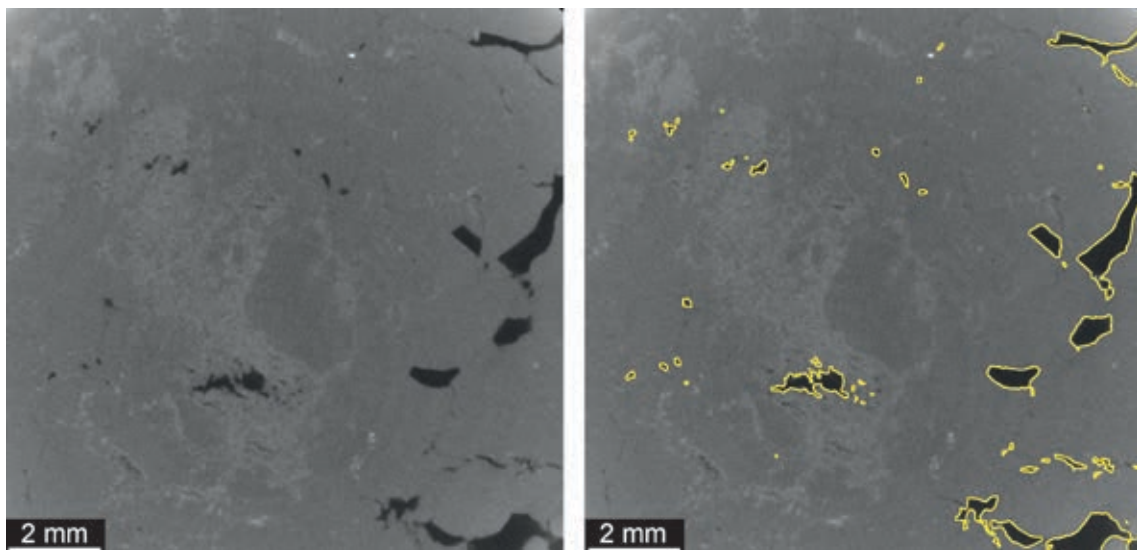


Abb. 31: Rohdatensatz eines CT-Scans (links) mit manuell, unter Nutzung von *VGStudio* extrahierten Porenvolumina (rechts) (Photos: N. Thiemeyer).

Die zweite Möglichkeit, Porositätsvolumina auf der Grundlage der Rohdatensätze zu quantifizieren, bietet die Software *ImageJ*. Im Gegensatz zur oben beschriebenen *VGStudio*-Methode können in *ImageJ* alle Voxel eines gewünschten Grauwerteintervalls automatisch detektiert werden (Abb. 32). Durch das Graustufenhistogramm kann die Voxelanzahl aller Grauwerte im gewünschten Intervall ermittelt werden. Dieser Voxelanteil an der Gesamt-Voxelzahl beschreibt somit das relative Volumen des ausgewählten Grauwertebereichs.

Unter Zugrundelegung der Voxelgröße (Scanauflösung) kann anschließend das absolute Volumen errechnet werden. Diese Methode kann sehr schnell durchgeführt werden. Allerdings fehlt dabei der Blick auf die räumliche Verteilung der Volumina. Außerdem sind durch die automatische Auswertung der CT-Rohdatensätze diffuse Strukturen schwer zu erfassen und genaue Volumenbestimmungen nur bei deutlichen Grauwerteunterschieden möglich.

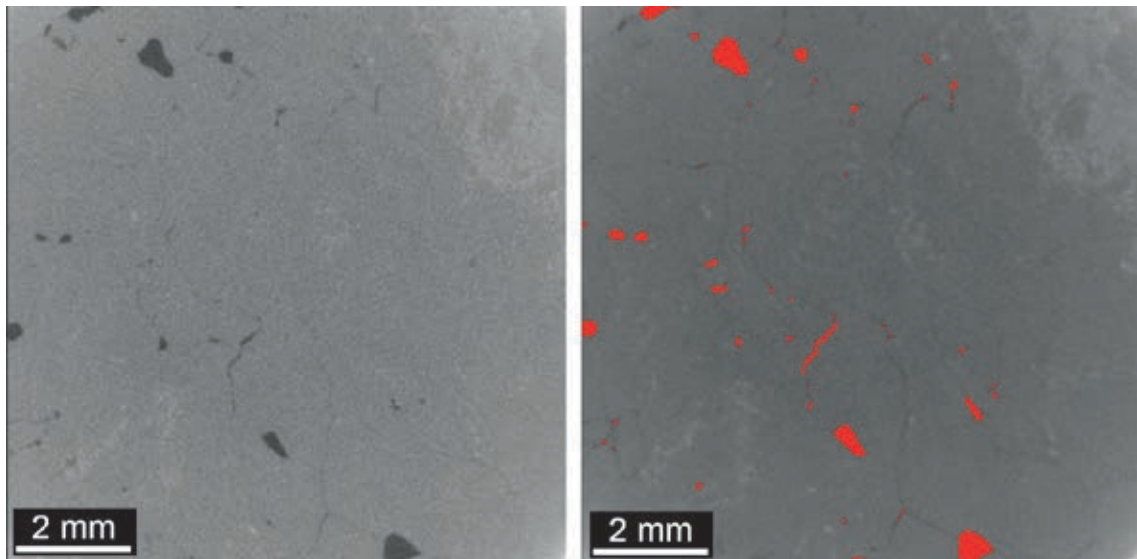


Abb. 32: Originaler (links) und mittels ImageJ ausgewerteter Rohdatensatz (rechts) mit automatisierter Auswahl von Porenraum über ein definiertes Graustufenintervall (Photos: N. Thiemeyer).

4.3.3.3 Ergebnisse: Analyse des Porenraumes auf der Grundlage der CT-Rohdaten

Die CT-Datensätze zeigen vier Hauptintervalle von Grauwerten. Kleine Pyritkörner erscheinen aufgrund der hohen Dichte als weiße Punkte. Sie sind nur akzessorisch vorhanden und mengenmäßig stark unterrepräsentiert. Die übrigen Grauwerttypen werden Halit, Anhydrit und dem Porenraum zugeordnet, deren Verteilung in den digitalen Bilderstapeln der CT-Rohdatensätze deutlich erkennbar ist.

Anhydritnester sind als hellgraue Flächen zu erkennen. Aufgrund der gewählten Scanauflösung sind singuläre Anhydrit-Einschlüsse nicht zu identifizieren. Allerdings zeigen die Nester die in den Dickschliffen beobachteten Muster. Sie umhüllen zumeist größere Halitkörner in Form unregelmäßiger Akkumulationen verschiedenster Größe und Form bis in den cm-Bereich.

Halit ist als graue Grundmasse zu erkennen und mit etwa 95 Vol.-% die dominante Phase. Größere Halitkörner werden in ihrer Form nur durch umgebende Anhydritcluster erkennbar, da (intakte) Halitkorn Grenzen wegen der geringeren Auflösung nicht zu detektieren sind.

Geweitete Korngrenzen oder transgranulare Risse, die in der Regel Fluideinschlüsse beherbergen, können deutlich als dunkelgraue Bereiche erkannt werden. Die Scanauflösung verhindert allerdings die Betrachtung einzelner Fluideinschlüsse entlang von Korngrenzen, da sie im Bildrauschen der Datensätze verschwinden.

Der Porenraum zeigt sich in den Datensätzen aufgrund der geringen Dichte in sehr dunkler Form. Es muss angenommen werden, dass der Porenraum in-situ mit Salzlösung und/oder flüssigen bzw. gasförmigen KW gefüllt ist (BURLIGA & CZECHOWSKI 2010, HAMMER et al. 2012). Während der Vorbereitung der CT-Kerne auf die Messungen zeigte sich ein geringer Flüssigkeitsaustritt mit aromatischem Geruch und Schlierenbildung an den gesägten oder geschliffenen Salzoberflächen.

Deutlich ausgebildeter Porenraum findet sich entlang von Halitkorngrenzen oder innerhalb der Anhydritnester. Die meisten Porenvolumina weisen gerundete Formen auf, jedoch werden in Ausnahmen auch Kristallflächen-dominierte Formen beobachtet, die polygonale Geometrie zeigen. Die Form des Porenraumes innerhalb der Anhydritcluster ist im Gegensatz hierzu körnig, diffus und netzförmig. Einzelne isolierte, in der Regel sehr kleine Volumina vervollständigen das Porenrauminventar der Rohdatensätze.

4.3.3.4 Ergebnisse: 3D-Rekonstruktionen der CT-Datensätze

Von den insgesamt 5 im Nano-CT analysierten Proben weisen 3 Proben aus den Bohrungen (RB685, RB686 und RB687) makroskopisch sichtbare Poren auf. Zwei Proben aus den Bohrungen (RB652 und RB657) repräsentieren exemplarisch Hauptsalzproben, die nicht durch eine makroskopisch sichtbare Porosität auffallen.

Bei den CT-Rekonstruktionen des Porenraumes konnte bei der Füllung der Poren nicht zwischen Luft sowie salinaren Lösungen und flüssigen bzw. gasförmigen KW unterschieden werden, sondern das Augenmerk wurde auf die Gesamtporosität gelegt. Die drei Kernabschnitte mit makroskopisch sichtbaren Poren sind durch einen erhöhten Gehalt von KW gekennzeichnet. Abb. 33 zeigt die 3D-rekonstruierten Porenraumverteilungen für die Proben RB685.004_CT, RB686.005_CT und RB687.005_CT.

Zur Visualisierung bei den 3D-Rekonstruktionen wurden verschiedene Projektionsmethoden gewählt. Die *Scatter* HQ- oder *Volume Renderer*-Darstellung (blau, Abb. 33) stellt jedes noch so kleine Volumen in der gleichen Farbintensität dar. Diese Darstellungsmethode erlaubt es, auch die kleinsten Poren bzw. Hohlräume betrachten zu können und die Gesamtzahl der Volumina besser beurteilen zu können. Die *Sum along*-Darstellung (orange, Abb. 33) visualisiert die Menge des in Blickrichtung gelegenen Volumens, indem größere Volumina heller dargestellt werden. So können Mengenverteilungen und -ausdehnungen besser erkannt werden, da größere Volumina optisch hervorgehoben werden.

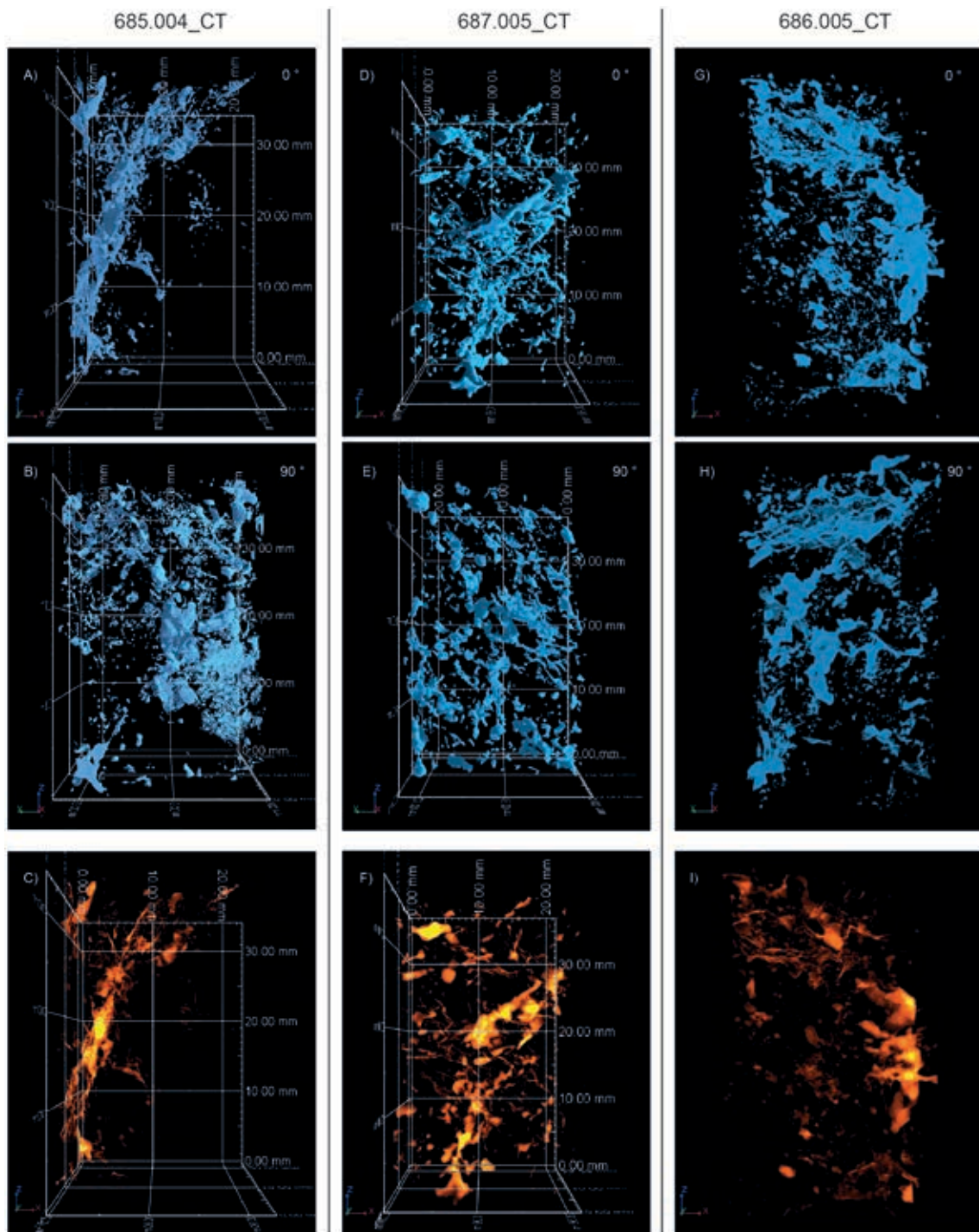


Abb. 33: Porenraumverteilung in der dreidimensionalen Rekonstruktion bei 0° (obere Reihe) und 90° (mittlere Reihe). Die *sum-along*-Projektion (c, f und i) veranschaulicht die Mengenverteilung der Poren durch hellere (viel Volumen) und dunklere Partien (wenig Volumen). Die Dimension der Probe RB686.005_CT entspricht in etwa der räumlichen Skala von RB685.004_CT (Photos: N. Thiemeyer).

Die 3D-Rekonstruktionen zeigen Verteilungsmuster der Porositäten, die sich prinzipiell an der Foliation bzw. an den Relikten der Foliation des Knäuelsalzes orientieren. Der Porenraum der Probe RB685.004_CT besteht aus vielen kleinen, meist isolierten, und wenigen größeren Volumina von mehreren mm³. Letztere sind meist rundlich geformt oder elongiert und in seltenen Fällen miteinander verbunden. Geweitete Korngrenzen, von denen einige bedingt durch die Probenahme oder -präparation entstanden sein könnten, sind im 3D-Datensatz als flächige, körnige Strukturen zu erkennen. In diesem Fall sowie bei sehr kleinen Poren ist die dreidimensionale Form des Porenraumes nicht exakt darstellbar, da die scanbedingten Auflösungsgrenzen erreicht werden und das Extraktionstool für eine Unschärfe sorgt. Kleine Volumina sind in den Rekonstruktionen immer isoliert. Die 3D-Rekonstruktion des Porenraumes von RB685.004_CT zeichnet eine signifikante Orientierung entlang einer steil stehenden, etwa 65° im Verhältnis zur Bohrlochachse geneigten Zone. Die Verteilung des Porenraumes innerhalb des Datensatzes ist sehr heterogen.

Die Probe RB686.005_CT zeigt teilweise ähnliche Porenraummuster wie die Probe RB685.004_CT (Abb. 33). Bevorzugte Orientierungen von Porenraum verlaufen einmal flach im oberen Bereich der Probe, und zum anderen steil stehend innerhalb des restlichen rekonstruierten Probenvolumens. Letzteres besteht teilweise aus größeren Poren (mm-Ausmaße), die miteinander verbunden sein können. Die flache Struktur im oberen Teil der 3D-Rekonstruktion besteht im Wesentlichen aus kleineren Volumina. Der restliche Datensatz des Porenvolumens wird aus weniger richtungsbezogenen Volumina aufgebaut, die keinen klaren räumlichen Zusammenhang aufweisen. Die *Sum-along*-Projektion zeigt die größten Volumina randlich im mittleren Teil der 3D-Rekonstruktion, während die obere Struktur diffuser erscheint.

Das 3D-Modell des Porenraumes der Probe RB687.005_CT zeigt im Vergleich zu den beiden anderen Proben Besonderheiten. Es werden weniger Porenräume dargestellt und eine foliationsbezogene Verteilung ist nur schwach ausgebildet, da die Volumina homogener verteilt sind als in den zuvor dargestellten Datensätzen. Es sind einige flach liegende Strukturen zu erkennen, die vermutlich Oberflächen von Halitkörnern folgen. In den *Sum-along*-Darstellungen zeigen sich deutlich einige tropfenförmige, mm-große Poren. Im Zentralbereich ist ein röhrenförmiger Kanal erkennbar, der sich über mehrere mm durch den gescannten Probenbereich zieht. Des Weiteren ist der Kernbereich des 3D-Datensatzes der Probe RB687.005_CT durch ein verästeltes Netzwerk gekennzeichnet. Einige der Porenvolumina sind miteinander verbunden (Abb. 34).

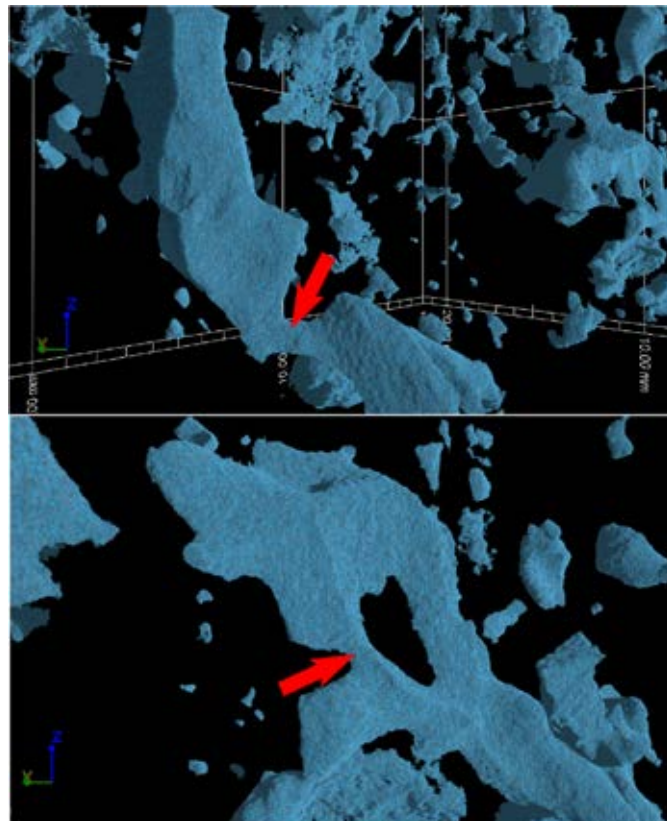


Abb. 34: Einzelne Porenvolumina im 3D-Datensatz der Probe RB687.005_CT können miteinander verbunden sein (Pfeile) (Photos: N. Thiemeyer).

Die Probe RB657.005_CT (Abb. 35) stellt eine Probe dar, die makroskopisch keine Poren aufweist und als Vergleich zu den z. T. porösen Kernen aus den Packerbohrungen RB685, RB686 und RB687 gescannt wurde. Die 3D-Rekonstruktion des Porenraumes mittels *VGStudio* zeigt, dass die Porositätsverteilung auf eine dünne, penetrative Struktur im Zentrum des Probenkörpers begrenzt ist. Poren im mm-Bereich fehlen ebenso wie Porenkanäle. Die extrahierten Porenvolumina sind i.d.R. kleindimensional und erzielen Porositätsanteile von 0,22 Vol.-% (*VGStudio*) bzw. 0,13 Vol.-% (*ImageJ*). Sie sind somit deutlich niedriger als die Werte, die für die KW-führenden Kernabschnitte aus den oben dargestellten Packerbohrungen ermittelt wurden (siehe Tab. 2). Ob die strukturelle Ausbildung der Porenvolumina einen präparatorisch induzierten Riss beschreibt, kann nicht eindeutig geklärt werden. Die relativ kleine Menge an diffus verteiltem Porenraum bei gleichzeitig verbesserter Auflösung im Vergleich zu den Bohrungen RB685, RB686 und RB687 kann dies zumindest nicht ausschließen. Handelt es sich wie angenommen um ein Artefakt, muss die primäre Porosität des Gesteins auf weniger als 0,1 Vol.-% geschätzt werden.

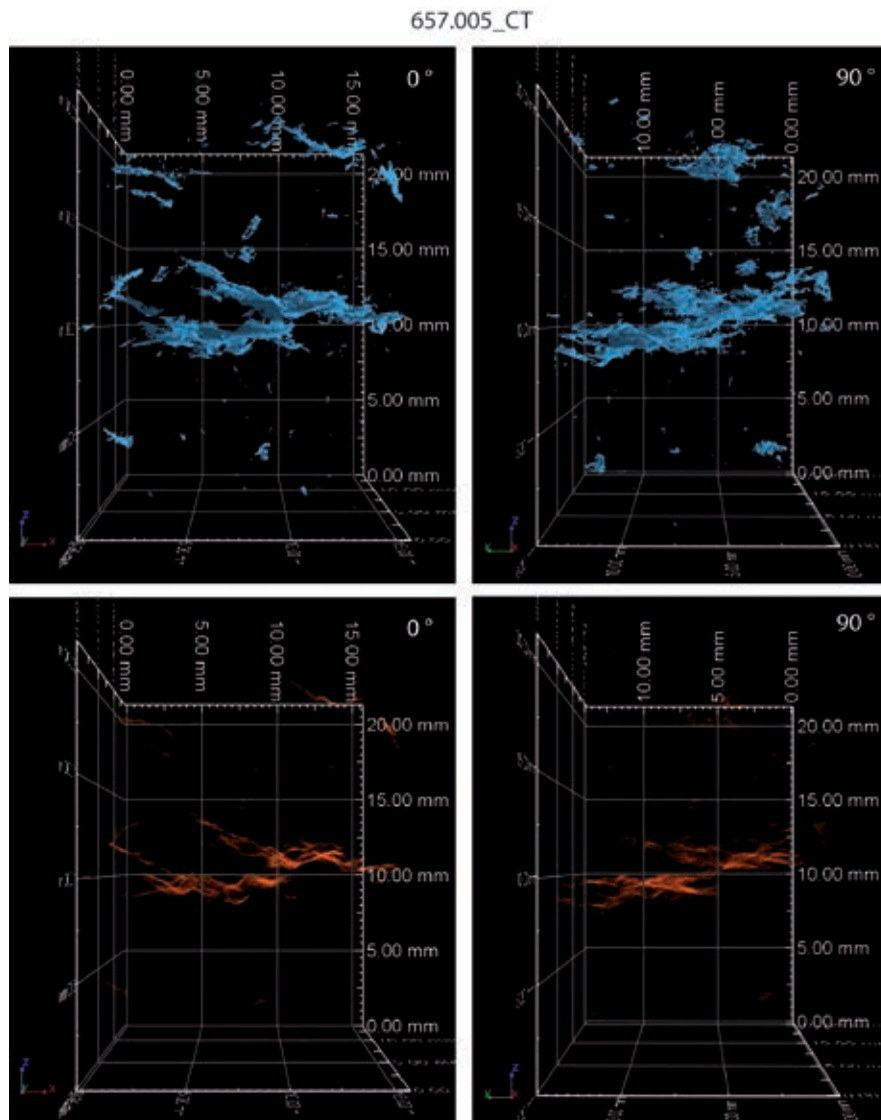


Abb. 35: Porenverteilung in der Probe RB657.005_CT in der dreidimensionalen Rekonstruktion. Der Porenraumanteil ist gering und limitiert auf eine dünne, penetrative Struktur im Zentrum des Probekörpers (Photos: N. Thiemeyer).

4.3.3.5 Ergebnisse: Quantifizierung des Porenraumes

Tab. 2 enthält für alle bisher vorliegenden Scan-Datensätze die Aufnahmeparameter, die räumliche Dimension des gescannten Probenbereiches sowie die aus den CT-Messungen abgeleitete relative und absolute Porosität. Die Scanzeiten variieren aufgrund unterschiedlicher Parameter wie z. B. der Belichtungszeit der jeweiligen Scanaufnahmen. Die Dimensionen beschreiben die Kantenlängen der in 3D rekonstruierten Probenvolumina. Die Auflösung der einzelnen Scans variiert leicht aufgrund von Unterschieden in den geometrischen Abstandsparametern zwischen Röntgenquelle, Probe und Detektor.

Die Probe RB686.005_CT weist unter Berücksichtigung beider Quantifizierungsmethoden den höchsten Porositätsanteil aller Proben auf (>1 Vol.-%), die Probe RB657.008_CT den niedrigsten. Die Probe RB685.004_CT zeigt für etwa die gleiche Dimension wie bei den Proben RB686.005 und RB687.005 nur etwa die Hälfte an Porosität, außerdem wurde in dieser Probe eine extrem heterogene Verteilung des Porenraumes detektiert. Diese Beobachtung zeigt, dass erhöhte Porositäten oft punktuell bzw. strukturell gebunden auftreten. Nicht nur innerhalb der Scandatensätze ist diese heterogene Verteilung zu beobachten, sondern auch makroskopisch an den Handstücken. So sind die Bereiche erhöhter Porosität in den Kernen sehr selten und nur an sehr wenigen Stellen bekannt.

Tab. 2: Scanparameter, räumliche Dimensionen der gescannten Probenvolumina und ermittelte Porositätswerte der bisher untersuchten Knäuelsalzproben.

Probe	Messzeit [min]	Dimensionen x; y; z [mm]	Scanvolumen [mm ³]	Auflösung [µm]	Porosität _{abs} [mm ³]		Porosität _{rel} [Vol.-%]	
					VGStudio	ImageJ	VGStudio	ImageJ
RB685.004_CT	185	22.19; 22.60; 38.47	1.93E+04	17.52	118	91	0.61	0.47
RB686.005_CT	205	21.43; 21.46; 37.69	1.73E+04	17.68	218	182	1.26	1.05
RB687.005_CT	205	21.26; 22.14; 36.54	1.72E+04	16.18	175	161	1.02	0.94
RB652.015_CT	168	16.08; 13.99; 21.83	4.91E+03	13.33	11	13	0.23	0.28
RB657.008_CT	200	15.54; 13.74; 20.99	4.48E+03	13.21	10	6	0.22	0.13

Die mittels *VGStudio* ermittelten Porositäten fallen bis auf eine Ausnahme (RB652.015_CT) leicht höher aus als die mit der *ImageJ*-Methode bestimmten Porositäten. Der relative Fehler der Quantifizierungen des fluidgefüllten Porenraumes sollte bei der *VGStudio*- und der *ImageJ*-Methode nicht größer als ± 15 % ausfallen. Die potenziellen Fehlerquellen bezüglich der Quantifizierung des Porenraumes werden in Kap. 4.3.5 erläutert.

4.3.3.6 **Ergebnisdiskussion: Probleme bei der dreidimensionalen Visualisierung des Porenraumes**

Die Grundlage der Volumenextraktion ist der Grauwertkontrast der CT-Rohdatensätze. Diffuse Korngrenzen beispielsweise können nur unzulänglich in Bezug auf ihre wahre Form visualisiert werden, da sie nur durch wenige Voxel beschrieben werden (Abb. 36). Größere, mit Luft oder Gas (z. B. gasförmige KW) gefüllte Poren sind durch ihre Ausdehnung und geringe Dichte deutlich besser darstellbar als mit Fluid dekorierte, schlanke Korngrenzen. Sehr kleine Einschlüsse, die nur einigen Voxeln entsprechen, können ebenso kaum visualisiert werden. Die Auflösung der Scans wird in erster Linie durch die Probengröße limitiert und reicht für die bisher untersuchten Knäuelsalzproben von 13.2 µm bis 17.7 µm. Hieraus ergibt sich, dass Partikel < ca. 50 µm nicht in den 3D-Rekonstruktionen dargestellt werden können, da sie im Bildrauschen verschwinden. Generell ist die Genauigkeit der Darstellung der Porenformen im dreidimensionalen Raum abhängig von der Auflösung und der Kontrastqualität im Rohdatensatz.

Ein anderer Einfluss auf die Darstellung der Form des Porenraumes ist durch den Toleranzbereich des Extraktionstools in *VGStudio* gegeben. Bei der Justierung der Grauwerttoleranz besteht das Ziel darin, alle Voxel eines entsprechenden Objektes zu markieren. Bei diffusen Strukturen, wie Korngrenzen, können Voxel miteinbezogen werden, die durch eine Unschärfe der Objektgrenzen (z. B. Porenraum) hinzugefügt werden, was zu einer minimalen Überbewertung des Objektes führt. Dies könnte die generell höheren *VGStudio*-Porositäten im Vergleich zu den *ImageJ*-Werten erklären.

Die Dickschliffanalysen zeigen vermehrt geweitete Korngrenzen oder transgranulare Risse, die mit Fluiden gefüllt sind. Diese Fluidvorkommen sind auf die Probenahme und die Präparation zu beziehen und stellen in ungestörtem Salzgestein zumindest in dieser Form und Häufigkeit keine Option für Fluidspeicherräume und -migrationswege dar. Eine Überbewertung des Porenvolumens durch Auflockerung während der Probenahme bzw. -präparation ist deshalb möglich, allerdings fehlt ein omnipräsentes Rissmuster in den Scanaufnahmen, obwohl die Probenstücke der Kerne deutlich beansprucht sind. Heterogene Verteilungsmuster in den 3D-Rekonstruktionen wie bei der Probe RB685.004_CT unterstützen die Argumentation, dass die dreidimensionale Visualisierung von artifiziellen Strukturen eher nachrangig zu bewerten ist.

Die Quantifizierung über *VGStudio* basiert auf manueller Extraktion von Volumina. So muss im Sinne eines optimierten Arbeitszeitaufwandes eine Grauwerttoleranz eingestellt werden, die das Extrahieren von vor allem diffusen Strukturen vereinfacht. Bei kontrastarmen Objekten besteht dadurch allerdings die Gefahr einer ungenauen und vielleicht mengenbezogen erhöhten Rekonstruktion. Dieser Überbewertung des Porenraumes wirkt allerdings entgegen, dass aus arbeitstechnischen Gründen nicht jede vom menschlichen Auge erkannte Struktur extrahiert werden kann (siehe Abb. 36), und dass durch die Scanauflösung Poren mit einer Größe < etwa 50 µm nicht in die Quantifizierung einbezogen werden.



Abb. 36: Problematik der Extraktion diffuser Fluidvorkommen oder Porenräume mit *VGStudio*. A: Intakte Korngrenzen sind für das menschliche Auge noch zu erkennen, verschwimmen jedoch bei starker Vergrößerung im Datensatz (B und C). Eine Extraktion dieser Speicherräume oder potenzieller Migrationswege ist beim *ImageJ*-Verfahren automatisiert und manuell nicht durchführbar (Photos: N. Thiemeyer).

Die automatisierte Quantifizierung von Porenraum mittels *ImageJ* beinhaltet alle Voxel im definierten Grauwertebereich und ist somit sehr exakt. Dadurch wird der Fehler bei der Quantifizierung nur durch die Qualität des CT-Rohdatensatzes beeinflusst. Die Rohdatensätze müssen gefiltert werden, da ansonsten Voxel des „Hintergrundrauschens“ im entsprechenden Grauwerteintervall mitdetektiert werden. Das Filtern (Medianfilter) führt allerdings zu einem Verschwimmen der Kontrastgrenzen einzelner Objekte. Hierdurch ergibt sich bei der automatisierten Quantifizierung eine Tendenz zur Unterbewertung des Porenraumanteils, was sich aber auf die relativen Porositäten nur minimal auswirken sollte. Diese Tendenz ist in den niedrigeren, mittels *ImageJ* bestimmten Porositätswerten relativ zu den *VGStudio*-Porenanteilen zu erkennen. Auch bei der *ImageJ*-Quantifizierungsmethode werden nur Objekte ab einer bestimmten Größe dargestellt. Dieser Grenzwert ist jedoch schwer einzuschätzen. Ein einzelner Voxel kann theoretisch detektiert werden, wird aber durch die Filter vermutlich verschwinden. Trotzdem ist, bedingt durch die Auflösung, der kleinstmögliche quantifizierbare Porenraum so groß wie ein Voxel. Dadurch können Poren, die kleiner als die Scanauflösung sind, nicht quantifiziert werden.

Beide Quantifizierungsmethoden zeigen Ungenauigkeiten, die jedoch aufgrund der oben genannten Argumente auflösungsbedingt Minimalwerte des Porenraumanteils darstellen sollten. Der relative Fehler der Porositätsbestimmung wird unter Berücksichtigung aller Faktoren auf etwa $\pm 15\%$ geschätzt.

4.3.3.7 Ergebnisdiskussion: Porositätswerte und Porenraumverteilungen

Die für die CT-Detailuntersuchungen ausgewählten Kerne der Packerbohrungen weisen als Besonderheit Abschnitte mit makroskopisch sichtbaren Poren auf. Es ist jedoch festzustellen, dass diese Gesteinsbereiche im bisher erkundeten Teil des Salzstocks Gorleben äußerst selten vorkommen und auf wenige cm im Bohrkern beschränkt sind. Die anhand der Computertomographie ermittelten Porositätswerte sind also sehr punktuelle Angaben und nicht als repräsentativ für das gesamte Knäuelsalz anzusehen. Dennoch können die Ergebnisse der CT-Analysen zum Verständnis lokal erhöhter Fluid- bzw. KW-Gehalte beitragen.

Die limitierte Auflösung der CT-Scans und der daran gebundene fehlende Nachweis aller Korngrenzenfluide und sehr kleiner Porenräume innerhalb der 3D-Datensätze reduziert die quantifizierten Porenraumvolumina. Die Probe RB685.004_CT zeigt ein heterogen verteiltes Porenmuster entlang einer planaren Vorzugsbahn (siehe Abb. 33). Zum einen zeigen sich einzelne Poren schon im 3D-Muster miteinander verbunden und zum anderen ist in den Bilderstapeln der Rohdaten eine Konnektivität klar zu erkennen. Ob diese Muster Reste ehemaliger Fluid-Migrationsbahnen darstellen oder konservierte primäre Poren sind, bleibt zu diskutieren. Die tropfenförmigen, scheinbar isolierten Verteilungsmuster der Probe RB687.005_CT (Abb. 37) hingegen weisen wahrscheinlich nicht auf ehemalige

Migrationsbahnen hin, sondern eher auf lokal angereicherte Fluidvorkommen, die im Zuge der Salzdeformation entstanden sind und als Relikte scheinbar meist foliationsparallel orientiert sind. Ein struktureller Bezug ist hier nicht so deutlich entwickelt wie bei der Probe RB685.004_CT.

Die untersuchten Dickschliffe aus porösen Kernbereichen der Packerbohrungen müssen im Hinblick auf die beobachteten Grenzbereiche zwischen Halit und Porenraum weiter untersucht werden. Grundsätzlich ist zu klären, ob es sich vor allem bei den größeren Poren um primäre oder sekundäre Strukturen handelt. Die in der Regel abgerundeten Halitkörner im Kontakt zum Porenraum zeugen entweder von gehemmttem Kristallwachstum oder von Lösungsprozessen. Da Lösungsprozesse innerhalb von Salzstrukturen aufgrund der physikochemischen Eigenschaften der intrasalinaren Lösungen nicht zu erwarten sind, könnten die abgerundeten Strukturen durch die Anwesenheit von KW erklärbar sein, die ein freies Wachstum des Halits während der Salzdeformation und Verheilung sowie der an den Salzaufstieg gebundenen Lösungsmigration verhinderten. Zumindest die Poren der Triplepunkte, die von den Halitkörnern eingeschlossen sind, passen zu der Annahme.

RB687.005_CT

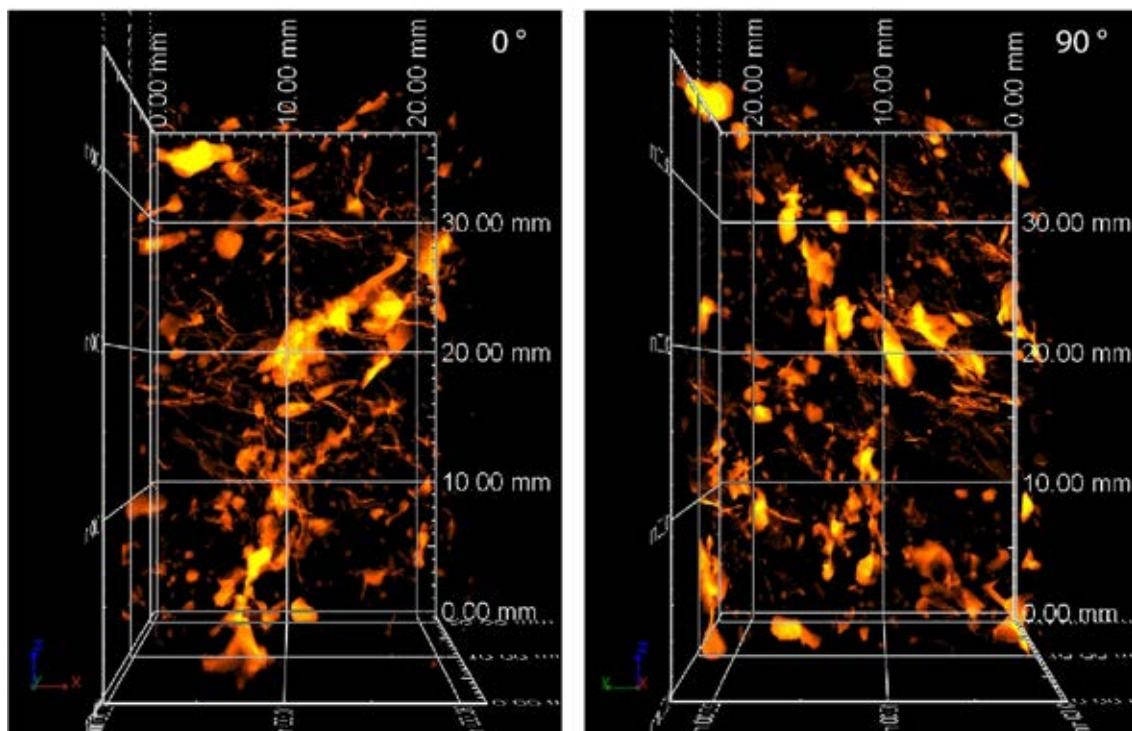


Abb. 37: *Sum-along*-Projektion von RB687.005_CT bei 0° (links) und 90° (rechts). Eine der Foliation folgende Verteilung des Porenraumes ist nur untergeordnet zu erkennen. Die größten Mengen an Porenvolumen sind isolierte tropfenförmige und gerundete Poren (Photos: N. Thiemeyer).

Im Verlaufe weiterführender Untersuchungen ist zu klären, ob es Hinweise auf syn- oder posthalokinetisch migrierte Fluide gibt. So könnte entlang von Bewegungsbahnen in Kombination mit hohem Fluiddruck Migration von Fluiden stattgefunden haben, die lokal Lösungserscheinungen zur Folge hatte. Die Dimensionen einiger der nachgewiesenen Porenräume passen nur unzureichend in das Bild des sonst stark deformierten, wieder verheilten Knäuelsalzes. Die Konnektivität des Porenraumes (Probe RB685.005_CT) widerspricht dem ansonsten stark durchbewegten, deformierten und wieder verheilten, niedrig-porösen Steinsalz.

Vermutlich wurden die nachgewiesenen fluidgefüllten Porenraummuster in einem frühen Stadium des Salzaufstiegs angelegt, da von einer Korrelation zwischen erhöhtem Porenvolumen und KW-Gehalt ausgegangen werden kann. Verhindern im Anschluss erhöhte KW-Gehalte eine Verheilung bzw. Schließung des Porenraumes, bleibt dieser als Relikt erhalten und dient unter Berücksichtigung der an den Salzaufstieg gebundenen nesterartigen KW-Verteilung möglicherweise als lokal begrenzter Transportweg bei Änderung der Fluiddruckzustände durch Bohrungen oder Auffahrungen. Die impulsartig erhöhten Zutrittsraten an KW in einigen Packerbohrungen können mit den beschriebenen Porenraummustern zusammenhängen. Eine Beeinträchtigung der ungehinderten Rekristallisationsprozesse im Salz durch die erhöhten KW-Gehalte könnte somit die Porenraummuster konserviert haben.

4.3.4 Ergänzende Untersuchungen an mikroporösen Knäuelsalzproben mittels Lichtmikroskop

Die Dickschliffe der im Nano-CT untersuchten Knäuelsalzproben wurden angeätzt, um Subkorngefüge sichtbar zu machen (siehe Kap. 4.3.1).

Durch den Einsatz eines blaugefärbten Harzes kann der Porenraum der Proben sichtbar gemacht werden (Abb. 38 und Abb. 39A-D). Deshalb wurden im Anschluss an die CT-Aufnahmen einige Dickschliffe aus teilweise mikroporösen Kernabschnitten aus drei KW-führenden Packerbohrungen im Vakuum mit blau-gefärbtem Epoxidharz imprägniert, um die Kerne für die weitere Präparation zu härten und die Form, die Kontaktbereiche und die Verteilung der Porenvolumina mikroskopisch sowie makroskopisch sichtbar zu machen. Die Dickschliffe wurden parallel und senkrecht zur Kern-Längsachse angefertigt und lichtmikroskopisch untersucht.

4.3.4.1 Untersuchungsergebnisse

Alle Proben zeigen deutliche Subkorngefüge, was darauf hinweist, dass kristallplastische Deformation stattgefunden hat. Das Harz ist in verschiedenen Bereichen der Dickschliffe lokalisiert. Während der Präparation der im Vakuum imprägnierten Proben zeigte sich, dass die Infiltrationstiefe des Harzes gering ist und nur maximal etwa 1 cm erreicht. Die

limitierte Eindringtiefe des Harzes ist auf dessen zu hohe Viskosität und auf die generell niedrige Permeabilität der Proben zurückzuführen. Im gesägten Schnitt der imprägnierten Proben zeigen sich deshalb nur wenige eingefärbte Probenbereiche (Abb. 38).

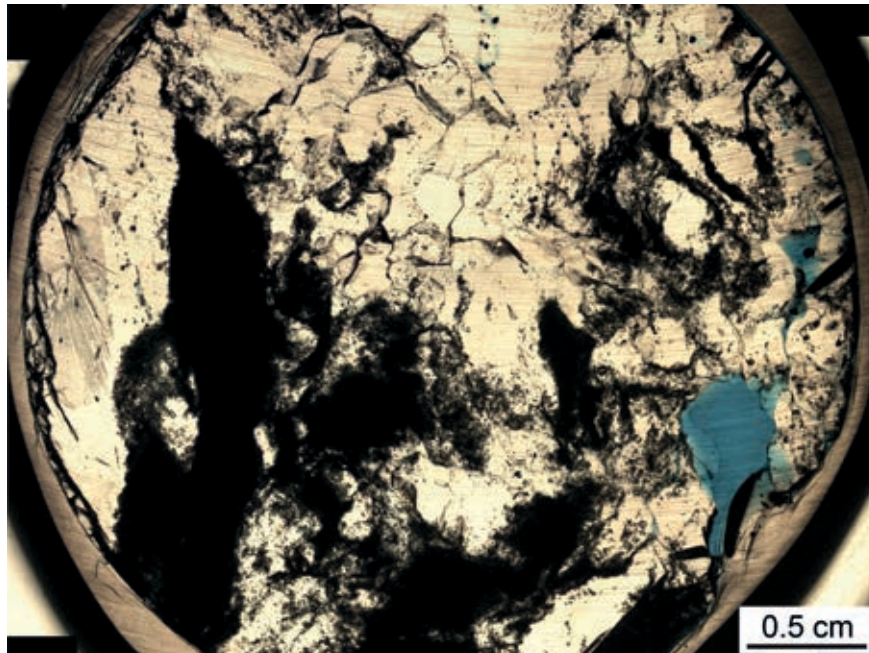


Abb. 38: Dickschliff der Probe RB686.005_CT im Durchlicht mit parallelen Nicols. Nur geringe Teile des Porenraumes werden durch blaues, infiltriertes Harz sichtbar (Photo: N. Thiemeyer).

Das Harz findet sich z. T. in den Anhydritclustern wieder (Abb. 39A), was sich im Durchlichtmikroskop in einem leichten blauen Schleier innerhalb der sonst dichten Anhydritcluster manifestiert. Eine detaillierte Betrachtung dieser Porenvolumina ist nicht möglich, sollte aber als sehr feinmaschiges Netzwerk mit relativ großer Oberfläche verstanden werden.

Geweitete Korngrenzen oder transgranulare Risse, bedingt durch Probenahme oder Präparation, können ebenfalls mit dem Harz sichtbar gemacht werden. Diese Probenahme- oder präparationstechnisch bedingten Hohlräume sind mengenbezogen relativ gering und erstrecken sich zusammenhängend nur über wenige mm. In nicht von derartigen sekundären Störungen betroffenen Knäuelsalzproben sind offene, nicht fluidgefüllte Porenräume äußerst selten, da eine In-situ-Rissbildung anzuzweifeln ist bzw. bruchhafte Strukturen unter Gebirgsauflast und viskosem Verhalten von Steinsalz verschlossen werden.

Die Korngrenzen können ausgehend von mikroskopischen Beobachtungen (HAMMER et al. 2012) fluidgefüllten Porenraum beherbergen. Kleinere Vorkommen sind an Triplepunkten der Halitkörner gebunden (Abb. 39D) oder als perlenschnurartige Einzeleinschlüsse von etwa 50 µm entlang von Korngrenzen, im Ausnahmefall sogar bis zu 500 µm im Durchmesser, ausgebildet (Abb. 39C). Des Weiteren existieren wellenförmige Streifen- oder „pinch-

and-swell“-Strukturen, welche Halitkörner je nach Ausdehnung voneinander separieren können (Abb. 39B). Werden diese Porenräume größer, ist eine Korngrenzengebundenheit schwieriger zu erkennen. Ob es sich bei den wellenförmigen Korngrenzenvolumina um eine Verbindung ehemals isolierter Poren handelt oder um ein unverschlossenes größeres Porenvolumen, wird in Kap. 4.3.5 diskutiert.

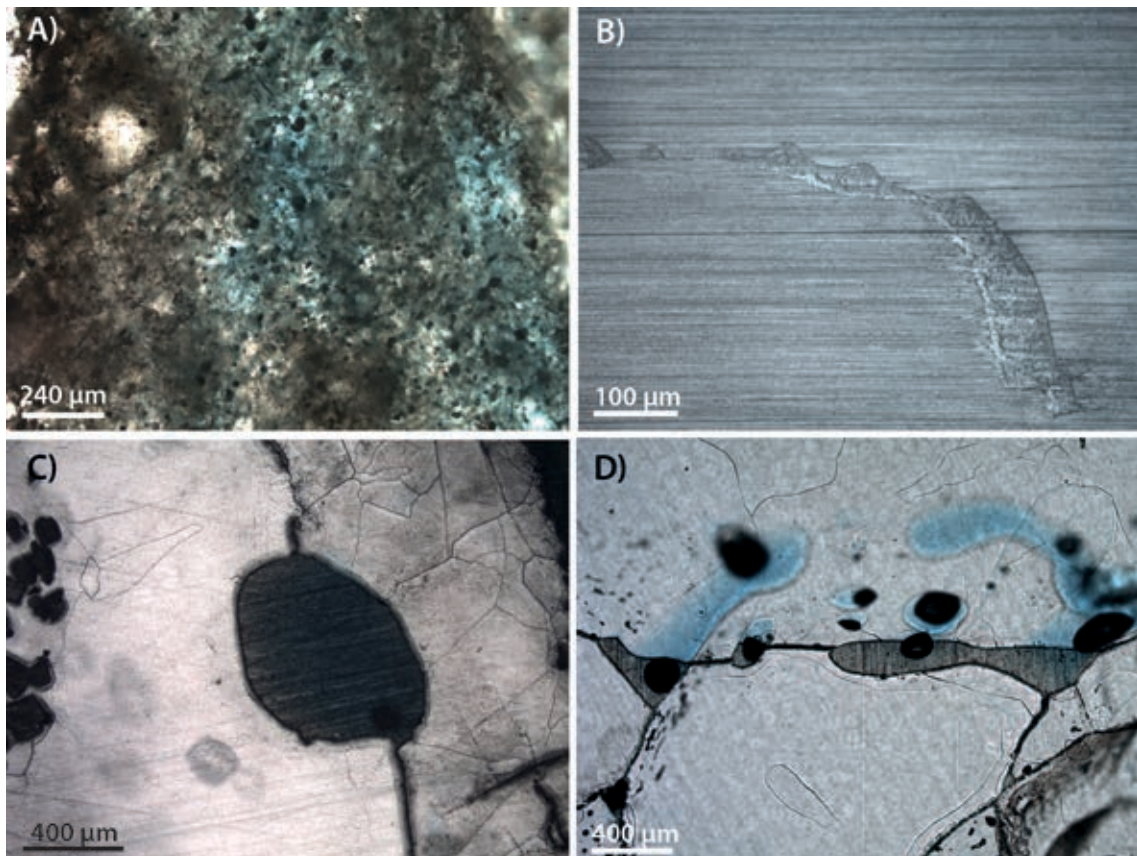


Abb. 39: Verschiedene Porosität-Ausbildungsformen im Dickschliff der Probe RB686.005_CT (Photos: N. Thiemeyer).
 A) Anhydritcluster im Durchlicht. Die Porosität wird durch das bläulich-schimmernde Harz sichtbar.
 B) Halitkorngrenze im Auflicht. Links sind isolierte Volumina zu erkennen, rechts formen sie wellige und breitere Strukturen.
 C) Geätzter Schliff im Durchlicht. Große Pore entlang von Halitkorngrenze.
 D) Geätzter Schliff im Durchlicht. Links ist Porenraum im Triplepunkt von Halitkörnern zu erkennen, rechts pflanzt sich der Porenraum entlang der Halitkorngrenze fort. Das blaue Harz deutet den Verlauf des Porenraumes mit der Tiefe an.

Poren mit mehreren mm³ Volumen zeigen die deutlichsten Imprägnationen mit Harz. Diese Poren stellen eine Besonderheit eines sehr geringen Teils der KW-führenden Proben aus dem Hauptsalz des Salzstocks Gorleben dar, wobei die Poren bereits im Handstück zu erkennen sind. In den Dickschliffen wird deutlich, dass diese großen Poren und die Grenzflächen Halit zu Harz in der Regel gerundet und wellig auftreten (Abb. 40). In einigen Bereichen scheinen kristallographisch definierte Kristallflächen die Form der Poren zu regeln. An solchen Porenvorkommen zeigt sich auch, dass das Harz ausgehend von den

größeren Poren zwickelförmig in Halitkorngrenzen vorzudringen scheint und dadurch schrittweise einzelne Halitkörner voneinander separiert.

Die Dickschliffe der porösen Kernabschnitte aus den Packerbohrungen zeigen nach derzeitigem Bearbeitungsstand keine idiomorphen, von Deformation nicht betroffenen Halitkörner, die in den Porenraum hineingewachsen sind. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sekundäres Mineralwachstum innerhalb des Porenraumes zu finden ist, wenn auch nur sehr untergeordnet.

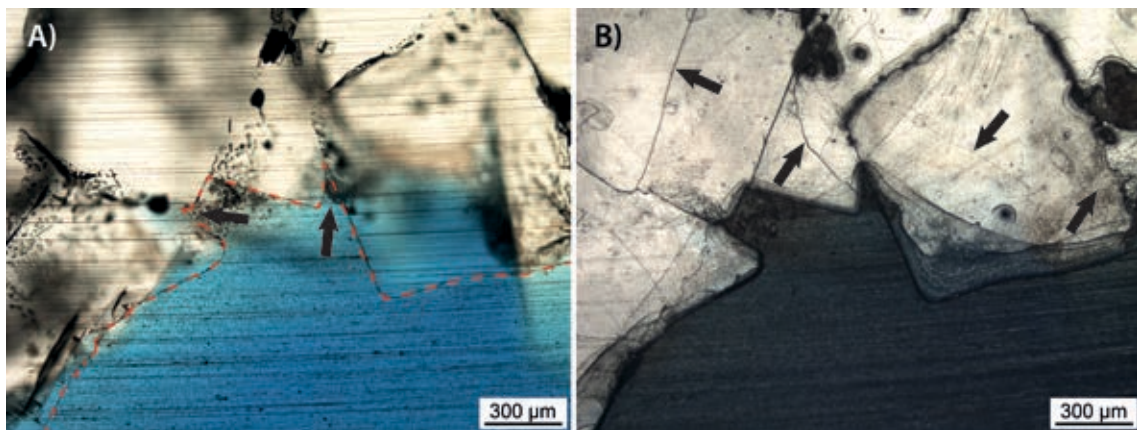


Abb. 40: A) Kontaktbereich von Salzgestein (oben, weißlich) zu mit Harz verfülltem Porenraum (unten, bläulich) im Durchlicht (Probe RB686.005_CT). Der Grenzflächenverlauf ist rot-gestrichelt und verläuft gerundet. In den Korngrenzenbereichen läuft der Eintrittsbereich des Harzes spitz zu (Pfeile; Photos: N. Thiemeyer).
B) gleicher Bildausschnitt wie A) jedoch unter Auflicht und geätzt. Die scheinbar in den Porenraum gewachsenen Halitkörner zeigen Subkorngrenzen (Pfeile), was kristallplastische Deformation belegt (Photos: N. Thiemeyer).

4.3.4.2 Bewertung der Probenimprägnation

Das blau gefärbte Harz ist in der Lage, den Porenraum im Dickschliff besser sichtbar zu machen und Hinweise über Speicherräume oder mögliche Migrationspfade für Fluide zu geben. Die Mengen an infiltriertem Harz sind trotz der erhöhten Porositäten gering. Die Randbereiche der Probenstücke sind deutlicher mit Harz durchtränkt als die Kernbereiche. Luftblasen sind nur selten in den Dickschliffen zu beobachten, sodass in diesen Bereichen von einer guten Imprägnation des zugänglichen Porenraumes ausgegangen werden kann. Durch die Probenahme geweitete Korngrenzen sind in der Regel mit Fluid gefüllt, was eine Harz Imprägnierung in diesen Bereichen verhindert. Im Ergebnis der Arbeiten ist zu bezweifeln, dass das verwendete Harz in der Lage ist, die Fluidspeicherräume und potentiellen Migrationswege in den Proben sichtbar zu machen. Die relativ hohe Viskosität des Harzes oder die Qualität des Vakuums bei der Infiltration sowie eingeschlossene Fluidphasen sorgen dafür, dass nicht jeder vorhandene Speicherraum bzw. potenzielle Migrationspfad von Harz verfüllt wird. Des Weiteren können isolierte Porenvolumina

nicht mittels Harz verfüllt werden. Der mit Harz imprägnierte Porenraum korreliert demzufolge auch nicht mit den dreidimensional rekonstruierten Porosität-Verteilungsmustern der CT-Scans. Dies unterstreicht die generelle Problematik und Ungenauigkeit der Porenraumquantifizierung an Gesteinen durch Infiltrationsmethoden mit organischer Flüssigkeit oder durch die Quecksilber-Injektions-Porosimetrie und zeigt die Vorteile der zerstörungsfreien Computertomographie.

4.3.5 Schlussfolgerungen aus den mikrostrukturellen Untersuchungen

Die teils deutlich ausgeprägten Subkorngefüge zeugen von kristallplastischer Deformation. Sowohl die Knäuel- als auch die Streifensalzproben weisen variable Subkorngefüge auf, für deren Interpretation begleitende EBSD-Messungen durchgeführt wurden (siehe Kap. 4.3.2).

Die an den Hauptsalzproben ermittelten Paläodifferentialspannungen passen in den für natürlich deformiertes Steinsalz erwarteten Wertebereich und sind in sich stimmig. Allerdings konnte bislang keine Korrelation zwischen KW-Gehalt, räumlicher Lage der Hauptsalzproben und ermittelter Paläodifferentialspannung nachgewiesen werden.

Die EBSD-Methode zeigt nach derzeitigem Stand der Arbeiten mikrostrukturelle Unterschiede zwischen Streifen- und Knäuelsalz. Das Streifensalz liefert trotz deutlicher Subkorngefüge keine Hinweise auf Rotation der einzelnen Subkörner. Somit kann Subkornrotations-Rekristallisation als Deformationsmechanismus für diese Einheit vorerst ausgeschlossen werden.

Mikrostrukturelle Unterschiede wurden nicht nur zwischen Knäuel- und Streifensalz nachgewiesen, sondern auch innerhalb des Knäuelsalzes. So zeigt die Probe RB659.015_1s ein charakteristisches, bisher nur in dieser Probe nachgewiesenes Deformationsmuster. Während in anderen Knäuelsalzproben fast alle Subkörner nur wenig gegeneinander verkippt sind, kann in dieser Probe ein deutlich rotiertes und wahrscheinlich als ehemaliges, aus einem früheren Deformationsereignis erhalten gebliebenes Subkorn zu bezeichnendes Korn identifiziert werden. Trotz der deutlichen Rotation des Korn zeigt sich in den Subkorncharakteristika unter dem Lichtmikroskop kein Unterschied zu den nicht oder nur sehr schwach rotierten Subkörnern.

Die Knäuelsalzprobe RB685.013_2s zeigt möglicherweise den Prozess der Korngrenzenmigration, was aufgrund eines charakteristischen, suturierten Korngrenzenverlaufes und unterschiedlicher Missorientierungsmuster der zwei benachbarten Halitkristalle vermutet wird.

An Knäuelsalzprobe RB655.009_s kann eindeutig gezeigt werden, dass es sich bei den Halitgroßkristallen des Knäuelsalzes nicht um späte, statisch rekristallisierte Partien handelt, da diese ebenso wie kleinere Halitkristalle deutliche Deformationsspuren in Form von rotierten Subkorngefügen und Gitterverbiegungen aufweisen. Generell ist bei keiner EBSD-Messung an Hauptsalzproben ein undeformierter Halitkristall gefunden worden. Selbst subkornfreie Kristalle sind über Distanzen von mehreren hundert μm durch ein, um mehrere Grad verkipptes Kristallgitter charakterisiert.

Nach den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen könnte ein Zusammenhang zwischen KW-Gehalt und Deformationscharakteristika der einzelnen Proben bestehen. Ob jedoch die in den Gesteinen nachgewiesenen KW für eine Begünstigung der Subkornrotation bzw. Hemmung anderer Deformationsmechanismen verantwortlich waren, oder ob beim Salzaufstieg stärker deformierte Bereiche mit größeren Mengen von KW imprägniert wurden, kann bislang noch nicht eindeutig geklärt werden. Es sind diesbezüglich weitergehende Untersuchungen geplant.

Die computertomographisch untersuchten, durch erhöhte KW-Gehalte charakterisierten Knäuelsalzproben (z2HS1) aus dem Q1W zeigen Porositäten von bis zu ca. 1,3 Vol.-%. Nicht-KW-führende Knäuelsalzproben sind im Salzstock Gorleben durch deutlich geringere Porositäten und sehr niedrige Fluidgehalte charakterisiert. Die in den KW-führenden Hauptsalzproben nachgewiesenen Poren im mm-Bereich sind in den halitischen Gesteinen des Salzstockes Gorleben äußerst selten. Die Bereiche erhöhter Porosität werden mit erhöhten KW- bzw. Fluidgehalten in Verbindung gebracht.

Die ursprüngliche Genese des deutlich ausgeprägten Porenraumes wird in einer ersten Einschätzung im früh-halokinetischen Stadium des Salzstockes in Kombination mit dem Eindringen von KW vermutet. Lokal erhöhte Mengen an KW könnten bei der Deformation des Salzgesteines ein Verheilen des Porenraumes ver- oder behindert haben. Die ehemals vorhandenen, an den halokinetischen Aufstiegsprozess gebundenen Migrationswege der eingedrungenen Fluidmengen sind beim Fehlen signifikanter KW-Mengen durch Verheilung verschlossen worden, wodurch die meisten KW-Volumina isoliert vorliegen. Über längere Zeiträume andauernde, impulsartige KW-Zutritte an wenigen Packerbohrungen könnten trotz extrem niedriger In-situ-Permeabilitäten von 10^{-21}m^2 mit einem teilweise verknüpften Porenraummuster, wie es die CT-Analysen visualisieren, erklärt werden.

Die zum Einsatz gekommene Computertomographie zeigt die Vorteile einer zerstörungsfreien Methode bei der Visualisierung und Quantifizierung des Porenraumes. Unter der Voraussetzung eines entsprechenden Materialkontrastes sind präzise Visualisierungs- und Quantifizierungsmöglichkeiten für den fluidgefüllten Porenraum gegeben. Im Vergleich zu anderen Quantifizierungsmethoden für die Porosität von Gesteinen liegt ein großer

Vorteil der CT-Technik darin, isolierte Volumina in Mengenbestimmungen mit einbeziehen zu können. Berechnungen von Porenradius und Porengröße sowie eine genauere Beschreibung des Porenraumes anhand von Permeabilitätsmessungen können durch die Computertomographie ergänzt bzw. komplett ersetzt werden.

Die 3D-Rekonstruktionen der CT-Rohdatensätze sind in der Lage, räumliche Verteilungsanisotropien, Mengen, Verbindungen und Formen jeglicher Volumen in den gewünschten räumlichen Skalenbereichen sichtbar zu machen. Diese Visualisierungsmöglichkeiten führen in Kombination mit mikroskopischen Beobachtungen zu einem detaillierteren Bild von Fluid-, Poren- und Mineralverteilungen. Sie ergänzen die klassische Dick- und Dünnschliffmikroskopie und tragen entscheidend zu besseren interpretatorischen Ansätzen bei. Gerade bei heterogen verteilten Porenvolumina wird der Vorteil der CT deutlich, nicht nur durch die genaueren Vorstellungen zu den räumlichen Verteilungen, sondern auch für die Mengenbestimmungen, die im Dick- oder Dünnschliff bei heterogener Verteilung nicht durchführbar sind. In diesem Fall ist die dreidimensionale Quantifizierung genauer und repräsentativer für einen größeren Bereich. Das analysierte Gesamtvolumen kann auf verschiedenen räumlichen Skalen analysiert werden, nicht nur innerhalb des gesamten Datensatzes (Abb. 41), sondern auch durch verschiedene, unabhängige Scans mit unterschiedlichen Auflösungen vom cm- bis in den μm -Bereich.

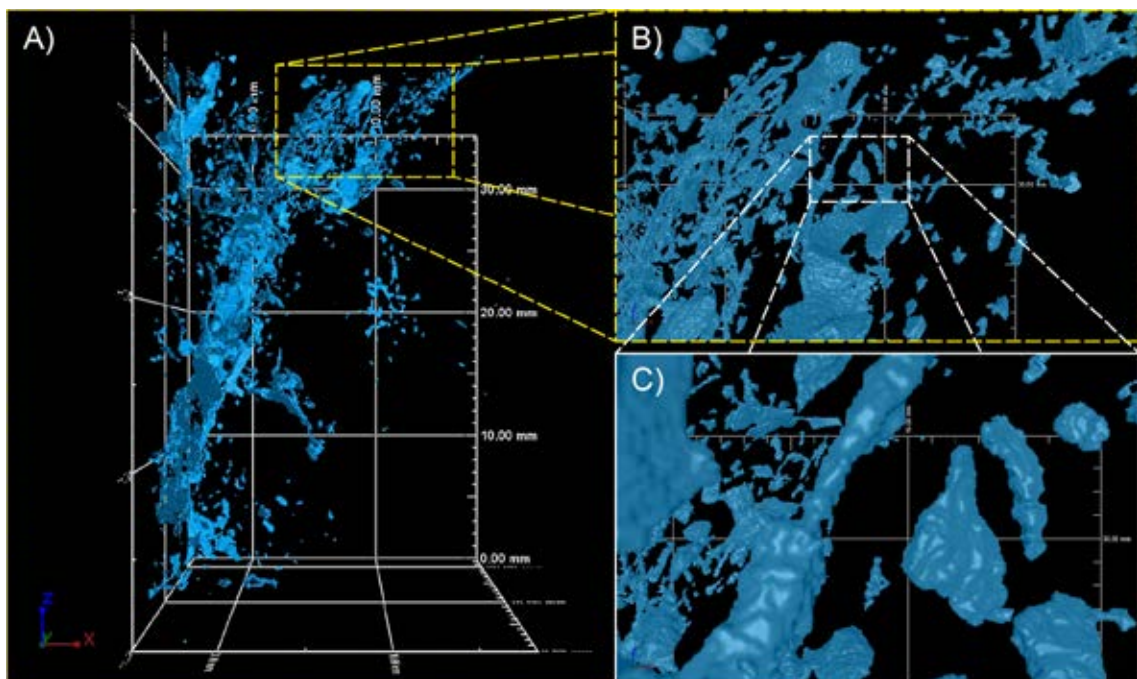


Abb. 41: Der dreidimensionale Datensatz (RB685.004_CT) erlaubt eine detaillierte Betrachtung auch einzelner Teilbereiche und Volumina auf verschiedenen räumlichen Skalen bis an die Auflösungsgrenzen der CT-Aufnahme. Die Methode lässt es zu, kleinste Formen in gewünschtem Blickwinkel zu betrachten (Photos: N. Thiemeyer).

5 Untersuchungen zur Verteilung der Kohlenwasserstoffe mittels Confocal Laser Scanning Microscopy

Für die dreidimensionale Analyse der mikrostrukturellen Verteilung unterschiedlicher Stoffgruppen der KW im mikroskopischen bis submikroskopischen Bereich wurden beispielhaft 3 Proben aus der Bohrung RB652 (Q1W) mittels *Confocal Laser Scanning Microscopy* (CLSM) untersucht und unter Verwendung der Software LAS AF (Leica Microsystems) ausgewertet. Die Anregungswellenlängen (AOTF) der eingesetzten Laser und die zugehörigen Detektionsbereiche sind in Tab. 3 aufgelistet.

Da es sich bei den durchgeführten Untersuchungen um die erstmalige Anwendung dieser Methode auf KW-führende Steinsalzproben handelte, wurde die Eindringtiefe der verwendeten Laser sowie die Auflösung zwischen den einzelnen Aufnahmen variiert, um die optimalen Einstellungen für die jeweiligen Aufnahmen zu ermitteln. Durch die Verwendung dreier verschiedener Laser (siehe Tab. 3) ist es möglich, potentiell vorhandene Unterschiede in der Zusammensetzung der in der Probe verteilten KW zu ermitteln und diese zu visualisieren. Das Scannen der Probe in mehreren Z-Ebenen erlaubt es zudem, ein Abbild der Probe zu generieren, welches unterschiedliche Z-Informationen enthält. Durch Addition der Einzelaufnahmen entsteht somit ein Bild, in welchem die dreidimensionale Struktur der Verteilung unterschiedlicher KW-Komponenten in dem untersuchten Probenbereich dargestellt werden kann. Da es sich bei der kombinierten Aufnahme ebenfalls um ein Stapelbild (Stacking-Aufnahme) handelt, geht auch hier, analog zu den mikroskopischen Stacking-Aufnahmen, der räumliche Tiefeneindruck gegebenenfalls (abhängig von der die Aufnahme betrachtenden Person) verloren. Allerdings lassen sich aus den einzelnen Stapel-Bildern rotationsfähige Film-Sequenzen berechnen, die eine dreidimensionale Betrachtung der in der Probe enthaltenen KW-Verteilungsstrukturen (z. B. durch Rotation um die X-, Y- oder Z-Achse) erlauben.

Tab. 3: Anregungswellenlängen (AOTF), Detektionsbereiche und farbliche Codierung der CLSM-Aufnahmen in Bezug auf die für die Analyse verwendeten Laser.

	Laser 1	Laser 2	Laser 3
Anregungswellenlänge (AOTF)	458 nm	496 nm	633 nm
Detektionsbereich	460 nm bis 491 nm	497 nm bis 628 nm	636 nm bis 800 nm
Farbcodierung	Blau	Grün	Rot

5.1 Ergebnisse der mikrostrukturellen Untersuchungen mittels CLSM

Die Analyse der Proben mittels CLSM ermöglicht einen detaillierten dreidimensionalen Einblick in die mikroskopische- bis submikroskopische Verteilung unterschiedlicher KW-Stoffgruppen im Salzgestein. Die CLSM-Stack-Aufnahmen bestätigen die Beobachtungen aus den Bohrkernaufnahmen, der Dünn- und Dickschliffmikroskopie sowie der Fluoreszenzmikroskopie, dass die KW im Salzgestein größtenteils als interkristalline Fluideinschlüsse, gebunden v. a. an die Korngrenzen der Halite und Anhydrite, vorkommen. Die KW liegen auf den Korngrenzen entweder in Form von isolierten Tropfen oder dendritisch zusammenhängenden bis flächenhaft verbreiteten Strukturen vor. Die chemische Zusammensetzung der KW scheint dabei bereits kleinräumig zu variieren, da die detektierte Fluoreszenz der KW in Abhängigkeit von der Anregungswellenlänge deutlich räumlich variiert, wobei die Fluoreszenzintensität mit Zunahme der Wellenlänge abnimmt. Dieses Verhalten der KW konnte bereits bei der UV-Photodokumentation der KW-Proben beobachtet werden, bei der unter Verwendung von UV-Strahlung der Wellenlänge 352 nm bzw. 368 nm aufgrund der geringeren Fluoreszenzintensität keine verwertbaren UV-Aufnahmen mehr erstellt werden konnten.

Die Korngrenze Halit-Halit einer Probe aus der KW-Probenahme-Kurzbohrung RB652 (Abb. 42) verdeutlicht die unterschiedliche räumliche Verteilung verschieden zusammengesetzter KW. Während die blau und grün codierten Laser 1 und Laser 2 (458 nm bzw. 496 nm) vollständig die Korngrenzen-KW abbilden, zeigt die Analyse der KW-Verbreitung mittels rot codiertem Laser einen deutlich kleineren Bereich an. Außerdem sind Intensitätsunterschiede im rechten Bildausschnitt zu beobachten, wodurch in der Aufnahme des rot codierten Lasers (633 nm) die punktförmigen KW kaum noch zu erkennen sind.

Neben der Korngrenze Halit-Halit treten die KW auch an den Korngrenzen Halit-Anhydrit oder Anhydrit-Anhydrit (v. a. in Anhydritclustern) auf. Die KW befinden sich dabei i. d. R. auf der Oberfläche der Anhydritkristalle in Form von anhaftenden Menisken oder streifenförmig entlang bzw. innerhalb von Spaltflächen (Abb. 43) und Kapillaren (Abb. 44), wie sie bereits im Dünnschliff (Abb. 14 A & B bzw. Abb. 16 C & D) und im ESEM (vgl. HAMMER et al. 2012) beobachtet werden konnten.

Teilweise sind innerhalb der Anhydritkristalle Kapillaren zu beobachten, in denen mehrphasige Fluideinschlüsse zu erkennen sind (siehe auch HAMMER et al. 2012). Die Kapillaren verlaufen in allen bisher untersuchten Anhydritkristallen im Dünn-/ bzw. Dickschliff, im ESEM und im CLSM immer spaltflächenparallel, wobei deren Länge entweder stark variiert oder bereichsweise auffällig identisch ist. Während unter dem Lichtmikroskop Kapillaren bis 100 µm Länge und 5 µm Durchmesser zu erkennen sind, konnten mittels CLSM Kapillaren zwischen 30 µm bis 1 µm Länge und 3 µm bis 300 nm Durchmesser, gefüllt mit unterschiedlich zusammengesetzten KW (Abb. 43 bis Abb. 45), nachgewiesen werden.

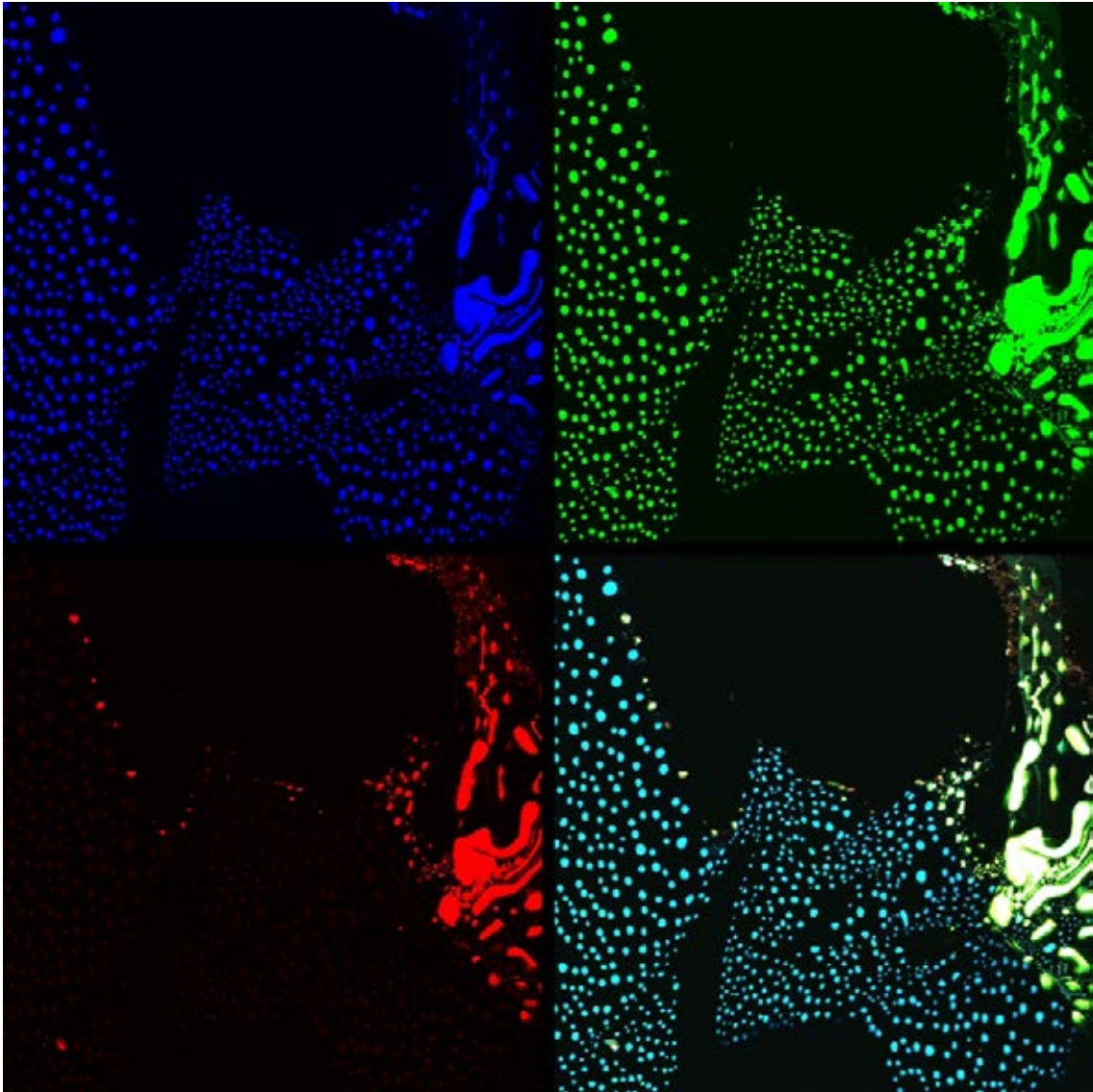


Abb. 42: Stack-Aufnahme von CLSM-Analysen einer KW-besetzten Korngrenze (Halit-Halit) im Knäuelsalz der Bohrung RB652 (Teufe 2,43 m bis 2,49 m; Farbcodierung vgl. Tab. 3). Die KW an den Korngrenzen der Halitkristalle weisen in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung ein unterschiedliches Fluoreszenzverhalten auf, welches sich auch in der kombinierten Aufnahme aller Laser (unten rechts) wiederfindet. Bildgröße: 246,03 μm x 246,03 μm ; Z-Eindringtiefe: 80,99 μm .

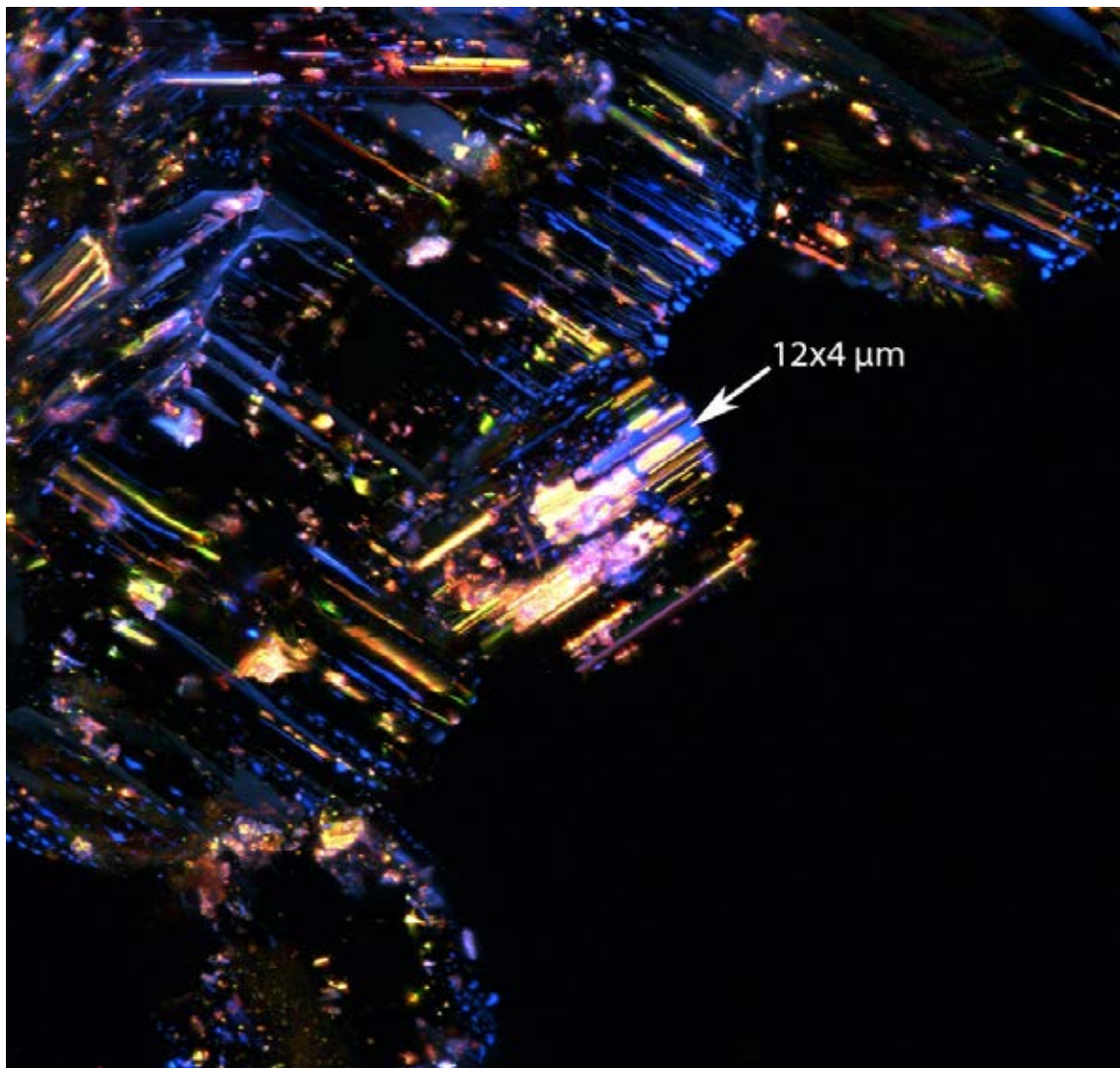


Abb. 43: Kombinierte Stack-Aufnahme von CLSM-Analysen eines KW-besetzten Anhydritclusters aus dem Knäuelsalz der Bohrung RB652 (Teufe 2,43 m bis 2,49 m; Lasertyp und Farbcodierung vgl. Tab. 3) mit allen drei Lasern. Unterschiedlich zusammengesetzte KW sind in Form von an der Oberfläche der Anhydritkristalle anhaftenden Menisken, linear auf Spaltflächen oder pseudo-intrakristallin in Kapillaren (Pfeil) zu beobachten, wobei die Kapillaren unterschiedliche KW-Füllungen sowie mehrere Fluid-Phasen aufweisen können. Bildgröße: 246,03 µm x 246,03 µm; Z-Eindringtiefe: 30,21 µm.

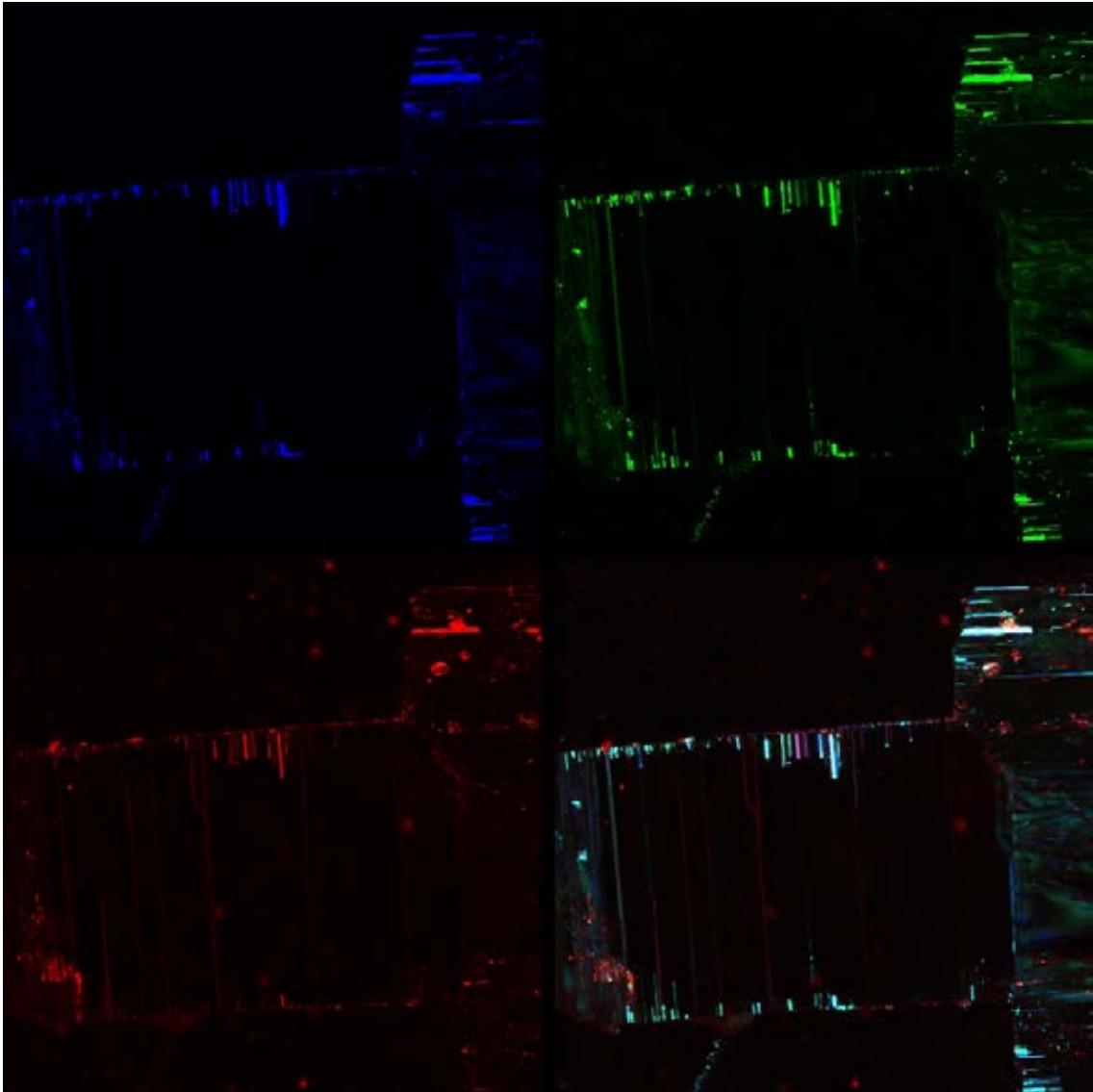


Abb. 44: Stack-Aufnahmen von CLSM-Aufnahmen eines Anhydritkristalls mit randlichen, spaltflächenparallelen Kapillaren aus dem Knäuelsalz der Bohrung RB652 (Teufe 2,43 m bis 2,49 m; Farbcodierung vgl. Tab. 3; kombinierte Aufnahme aller Wellenlängen: unten rechts). Bildgröße: 235,86 μm x 235,86 μm ; Z-Eindringtiefe: 20,14 μm .

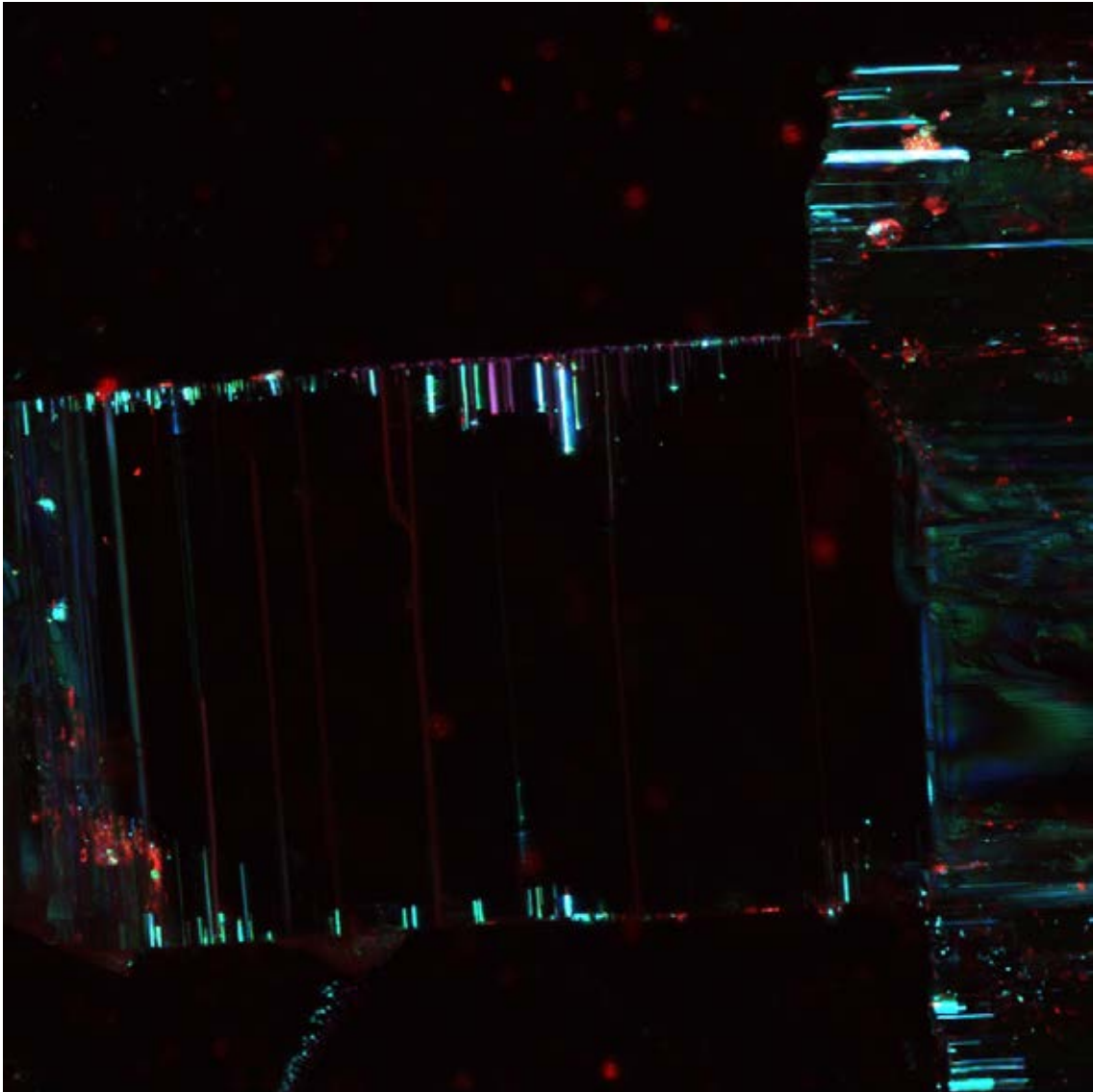


Abb. 45: Vergrößerung der kombinierten Stack-Aufnahme in Abb. 44. Der Anhydritkristall aus dem Knäuelsalz der Bohrung RB652 (Teufe 2,43 m bis 2,49 m) ist von zahlreichen spaltflächenparallelen Kapillaren durchzogen (Kapillarlänge 300 nm bis 3 μm ; Durchmesser 1 μm bis 30 μm), die unterschiedlich zusammengesetzte KW-Füllungen aufweisen. Bildgröße: 235,86 μm x 235,86 μm ; Z-Eindringtiefe: 20,14 μm .

Im Zuge weiterführender Arbeiten ist geplant, chemisch reine KW-Verbindungen als Referenzverbindungen für typische KW-Gruppen mittels CLSM zu untersuchen. Diese Form der Eichung der CLSM-Aufnahmen gestattet es, Informationen über die Zusammensetzung bzw. die Gruppenzugehörigkeit der in den Salzgesteinsproben möglicherweise ungleichmäßig verteilten KW-Stoffgruppen zu erhalten.

5.2 *Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen von Kohlenwasserstoffhaltigen Hauptsalzproben mittels CLSM*

Die lasermikroskopischen Aufnahmen mit dem Confocal Laser Scanning Microscope zeigen, dass die Zusammensetzung der interkristallinen KW bereits im kleinräumigen Maßstab Schwankungen unterworfen ist. Obwohl die Zuordnung der CLSM-Signale zu unterschiedlichen KW-Stoffgruppen auf Grund noch ausstehender Referenzmessungen an reinen KW-Verbindungen noch nicht möglich ist, ist im Hinblick auf die unterschiedliche räumliche Verteilung von KW-Komponenten mit verschiedenem Fluoreszenzverhalten davon auszugehen, dass die KW-Verbindungen submikroskopisch heterogen als Korngrenzenfluide bzw. in Kapillaren im Anhydrit verteilt sind. Die KW treten sowohl mikroskopisch als auch submikroskopisch (im Nanometerbereich) als isolierte oder dendritisch bis flächenhaft vernetzte Fluideinschlüsse mit lokal schwankender Zusammensetzung und unterschiedlichen Aggregatzuständen auf.

Während sich die KW in der halitischen Matrix überwiegend interkristallin auf Korngrenzen und Rissen und nur selten in intrakristallinen Fluideinschlüssen befinden, treten die KW in den anhydritreicheren Partien überwiegend auf der Kornoberfläche der Anhydritkristalle anhaftend, in Korngrenzenwickeln oder in Kapillaren auf, wodurch sie in Abhängigkeit von ihrer Molekulargröße, Zusammensetzung und ihrem Aggregatzustand unterschiedlich stark im Gestein gebunden sind.

6 *Gehalte, Zusammensetzung und Genese der Kohlenwasserstoffe im Hauptsalz des Querschlages 1 Ost*

6.1 *Kontaminationen der Bohrkernoberfläche im Querschlag 1 Ost*

6.1.1 *Vor Beginn der Bohrarbeiten ergriffene Maßnahmen zur Qualitätssicherung*

Vor Beginn der KW-Probenahme-Kurzbohrungen im Frühjahr 2011 wurden bei der BGR verschiedene, von der DBE üblicherweise im Bohrprozeß genutzte Schmiermittel untersucht, da der Bohrstrang einerseits geschmiert werden muss, andererseits jedoch eine Kontamination der Bohrkernoberfläche mit „technischen“ KW ausgeschlossen werden muss. Die von der DBE zur Verfügung gestellten Schmiermittel wurden im Labor der BGR in einem Gaschromatographen (GC) mit Flammenionisationsdetektor (FID) analysiert. Von den untersuchten Schmiermitteln basiert einzig die Schmierwirkung des Teflon-Sprays Bonnaflon nicht auf einem KW-Gemisch. Daher wurde mit der DBE vor Beginn der Bohrarbeiten vereinbart, dass ausschließlich das Teflon-Spray Bonnaflon zur Schmierung des Bohrstranges während der KW-Bohrungen verwendet werden darf. Alle Bohrkern-

der ersten Probenahmeserie im Frühjahr 2011 (Q1W) waren optisch unauffällig und frei von Kontaminationen mit höher siedenden KW oberhalb der Bestimmungsgrenze.

6.1.2 Befunde der Bohrungskampagne im Querschlag 1 Ost im Herbst 2011

Der zweite, im Herbst 2011 im Q1E gewonnene Bohrkern (RB675) wies einen fettig glänzenden Fleck auf. Auf Vorschlag der DBE wurden die Bohrkern seitdem nur von Geologen und mit Einmalhandschuhen aus dem Bohrergerät entnommen. Jedoch wiesen auch nach dieser Maßnahme weitere Bohrkern unter UV-Strahlung fluoreszierende Flecken auf, deren Ursache aufgrund der Zusicherung von DBE, dass die Bohrarbeiten genau wie im Q1W und mit derselben Technik durchgeführt wurden, zunächst unklar blieb. Aufgrund weiterer Fettflecken wurden die Bohrarbeiten nach der neunten Bohrung unterbrochen und das Bohrergerät wurde aufwändig gewartet und gereinigt.

Im Verlaufe dieser Bohrpause wurden die äußerlich sichtbaren Kontaminationen an den Bohrkernen chemisch untersucht. Es wurde dabei deutlich, dass die Kontamination zumindest der Bohrung RB681 auf ein höher siedendes KW-Gemisch zurückzuführen ist. Das Chromatogramm ähnelte dem Chromatogramm typischer Schmierfette.

Diese Befunde ließen eine systematische Untersuchung von Bohrkernen aus den Probenahmeserien im Frühjahr 2011 und im Herbst 2011 sinnvoll erscheinen. Zur Bestimmung der an den Bohrkernen anhaftenden KW wurde ein Schnelltest entwickelt: Der mit einem Skalpell von einer definierten Fläche gewonnene Salzstaub wurde mit iso-Hexan extrahiert, der Extrakt filtriert und in einem GC mit FID analysiert. In Abb. 46 ist beispielhaft ein Chromatogramm einer Probe eines Bohrkerns aus der Probenahmeserie im Herbst 2011 dargestellt. Die abgeschätzte Menge der anhaftenden KW beträgt 11 mg/kg Gestein.

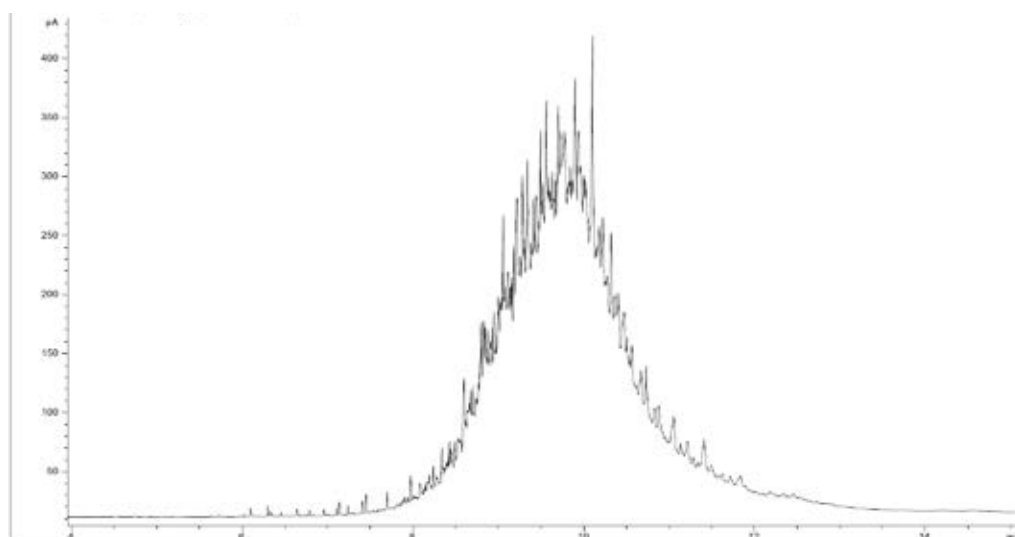


Abb. 46: Chromatogramm der Anhaftungen an der Oberfläche eines Bohrkerns der Bohrung RB676 aus dem Q1E (Probenahme im Herbst 2011).

Es wurde deutlich, dass an den Bohrkernen aus der Probenahmeserie im Herbst 2011 eine signifikante Menge eines KW-Gemisches anhaftete, während dies bei den Bohrkernen aus der Probenahmeserie im Frühjahr 2011 nicht der Fall war.

Zur Bestimmung des KW-Gehaltes im Steinsalz wurden die dafür vorgesehenen Bohrkernabschnitte in Wasser aufgelöst und der KW-Gehalt anschließend analysiert. Auch in diesen Proben aus der Bohrkampagne im Herbst 2011 wurde eine Kontamination mit Schmiermitteln nachgewiesen. Es wurde anhand der Analyseergebnisse der Schmiermittelgehalt [mg/kg] am Salzgestein abgeschätzt. In Abb. 47 ist dieser Gehalt als Funktion der zeitlichen Reihenfolge der Bohrungen dargestellt. Die Bohrungen sind dabei chronologisch von links nach rechts angeordnet. Jeweils fünf aufeinanderfolgende Proben gehören zu einer Bohrung.

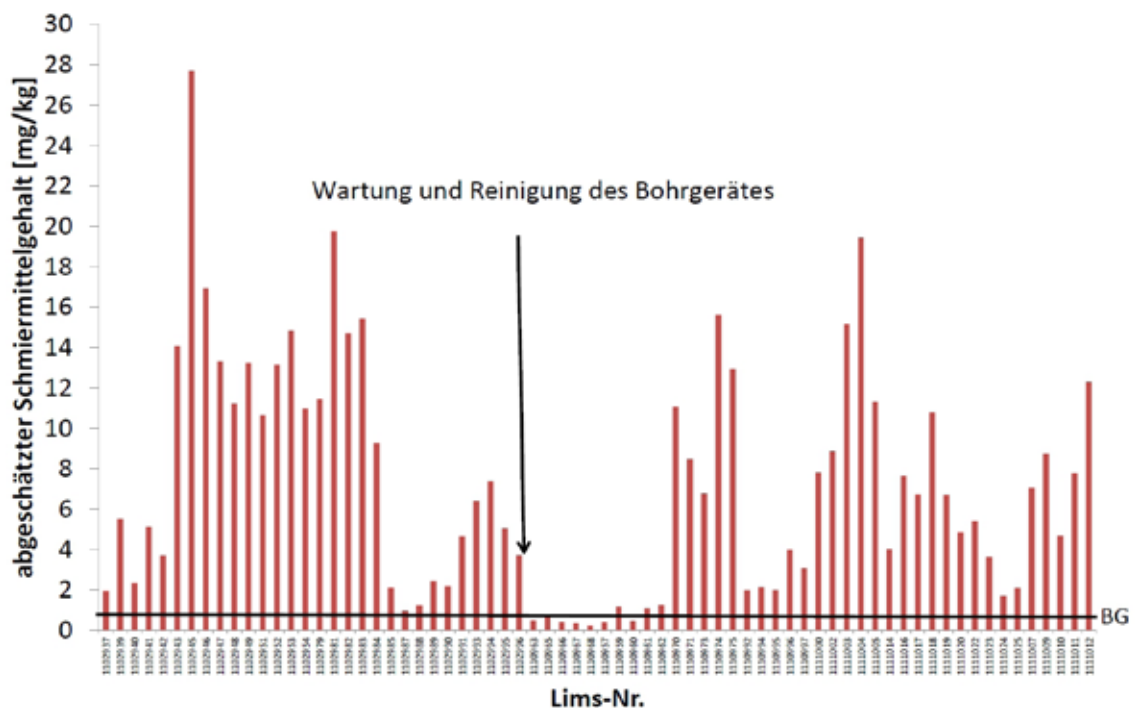


Abb. 47: Abgeschätzter Gehalt an höher siedenden KW aus Schmiermitteln in den aufgelösten Salzproben aus der Bohrkampagne im Herbst 2011. Chronologische Darstellung der Proben von links nach rechts. Die horizontale Linie stellt die Bestimmungsgrenze (BG) von 0,8 mg/kg Gestein dar.

Mit Ausnahme der Bohrung direkt nach der Wartung und Reinigung des Bohrgerätes liegt der Schmiermittelgehalt der Proben aller Bohrungen signifikant über der Bestimmungsgrenze von 0,8 mg/kg Gestein.

6.1.3 Eingrenzung der Kontaminationsquelle

Zur Eingrenzung der Quelle der technischen Kontaminationen der Bohrkern wurden alle am Bohrprozeß beteiligten technischen Geräte und Hilfsstoffe überprüft; der Bohrstrang wurde mit Wischtests untersucht. Dafür wurden Glasfaserfilter verwendet, die bei 400°C im Ofen vorgeglüht wurden. Die Glasfaserfilter wurden vor Ort mit Dichlormethan getränkt. Mit einem getränkten Glasfaserfilter wurde dann ein Wischtest an den verschiedenen Einzelteilen des Bohrstranges vorgenommen. Im Labor wurden die Glasfaserfilter mit iso-Hexan extrahiert und der Extrakt wurde in einem GC mit FID analysiert.

Zur Spülung der Bohrung wurde Druckluft verwendet, die von einem Kompressor erzeugt wird und einen Kältetrockner durchläuft. Diese Druckluft wurde hinter dem Kompressor sowie hinter dem Kältetrockner beprobt. Als Adsorber wurde für diesen Zweck eine Schüttung (Festbett) aus Florisil® (Magnesiumsilikat) verwendet. Mit einer Vakuumpumpe wurde ein Volumenstrom von ca. 6 l/min durch die Schüttung gezogen. Die Beprobungsdauer der Druckluft hinter den Kompressoren und Kältetrocknern betrug jeweils fünf Minuten. Nach der Beprobung wurde die Schüttung mit iso-Hexan extrahiert und der Extrakt in einem Gaschromatographen (GC) mit FID analysiert. Bei der Beprobung der Druckluft wurden makroskopische Verunreinigungen (Fettflocken und Fetttropfchen) in der Druckluft festgestellt. Diese wurden beprobt. Im Labor wurden diese Proben in iso-Hexan gelöst und im GC mit FID analysiert.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten ergaben folgendes Bild:

- Alle Bohrkern der KW-Bohrungen aus der Probenahmeserie im Herbst 2011 im Q1E waren äußerlich mit einem KW-Gemisch kontaminiert, welches als Schmiermittel identifiziert werden konnte.
- Alle Einzelteile des Bohrstranges für die KW-Bohrungen waren mit einem KW-Gemisch kontaminiert, dessen Chromatogramm häufig Ähnlichkeit mit dem KW-Gemisch aufweist, welches äußerlich an den Bohrkernen gefunden wurde. Dies wurde durch Wischtests belegt.
- Die Kompressoren und Kältetrockner sind eine Quelle der Verunreinigung der Druckluft mit KW. Das Chromatogramm dieser KW weist häufig Ähnlichkeit mit dem Chromatogramm des KW-Gemisches auf, welches äußerlich an den Bohrkernen gefunden wurde.

6.1.4 Maßnahmen zur Beseitigung der Kontaminationsquelle

Als erste Maßnahme wurde der für die KW-Bohrungen genutzte Bohrstrang unter Tage von Mitarbeitern der DBE gereinigt. Durch Wischtests und durch Probebohrungen wurde belegt, dass diese nachträgliche Reinigung unzureichend war. Es erfolgte eine weitere Reinigung des Bohrstranges für die KW-Bohrungen bei der Fa. Pengel in Dannenberg. Hierfür wurden mit Aceton getränkte Stofflappen und ein Aceton-Bad verwendet. Diese Reinigung war erfolgreich, wie anschließend durch Wischtests belegt wurde.

Um die KW-Emissionen in der Druckluft zu verringern, wurde für die zweite Kampagne der KW-Bohrungen im Q1E im Frühjahr 2012 der Kompressor 5 mit dem einteiligen Kältetrockner eingesetzt, da diese Kombination die geringste KW-Emission aufwies. Zusätzlich wurde für die Druckluft ein Filter eingesetzt, der KW-Aerosole zurückhält. Weiterhin wurden die Schläuche für die Druckluft erneuert, da diese im Inneren mit KW kontaminiert gewesen sein könnten.

6.1.5 Zusätzliche qualitätssichernde Maßnahmen während der Bohrkampagne im Frühjahr 2012

Zur Prüfung auf etwaige äußere Kontaminationen wurde neben einer genauen Inaugenscheinnahme an allen Bohrkernen ein Schnelltest durchgeführt. Für diesen Schnelltest wurde an jedem Bohrkern an drei Stellen eine Fläche von je 52 cm² mit einem Skalpell abgetragen. In Abb. 48 ist der abgeschätzte Gehalt [mg/kg Gestein] an äußerlich anhaftenden KW für alle 20 Bohrungen der Probenahmeserie im Frühjahr 2012 dargestellt.

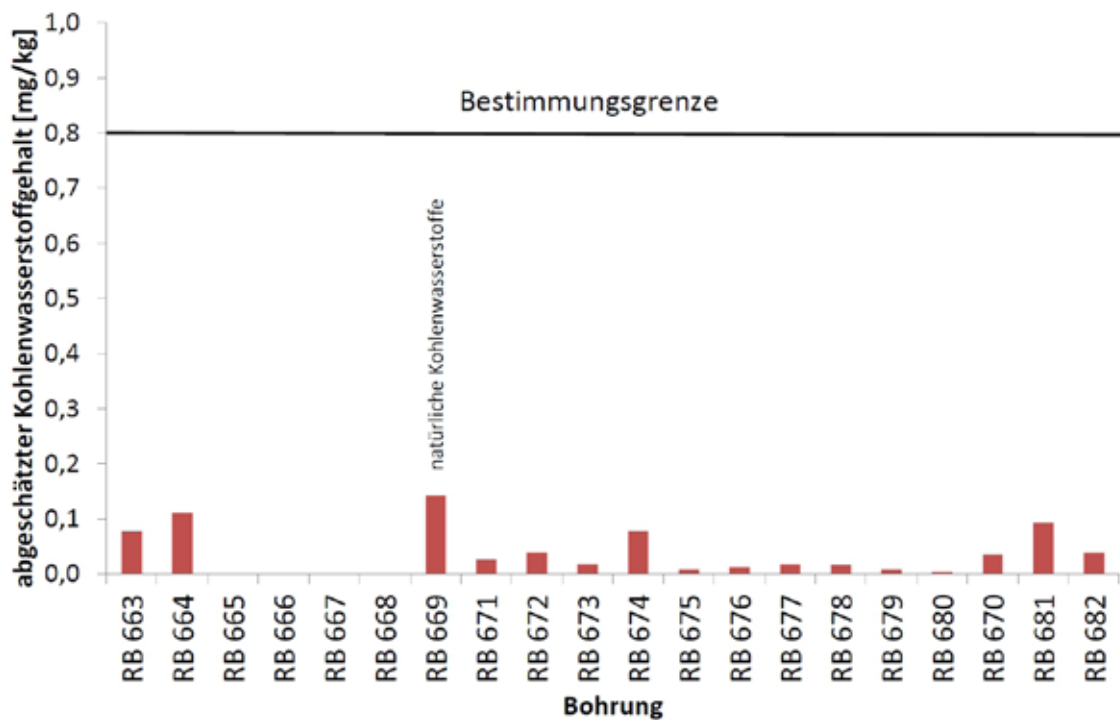


Abb. 48: Abgeschätzter Gehalt an äußerlich anhaftenden KW für die Probenahmeserie im Frühjahr 2012 (Q1E). Chronologische Darstellung der Bohrungen von links nach rechts. Die horizontale Linie stellt die Bestimmungsgrenze der KW-Analyse von 0,8 mg/kg Gestein dar.

Bei allen Bohrkernen liegt der Gehalt deutlich unterhalb der Bestimmungsgrenze (Abb. 48), so dass alle erbohrten Kerne aus der im Frühjahr 2012 wiederholten Probenahmeserie zur Bestimmung des KW-Gehaltes im Hauptsalz im Umfeld des Q1E im Salzstock Gorleben herangezogen werden konnten.

6.2 Methodenanpassungen im Vergleich zu den Arbeiten in 2011

Eine ausführliche Darstellung der bei der Bestimmung der Gehalte und der molekularen Zusammensetzung der KW im Hauptsalz des Salzstocks Gorleben eingesetzten Untersuchungsverfahren ist in HAMMER et al. (2012) enthalten. Hier werden lediglich ergänzende Angaben zu den Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der angewendeten Analyseverfahren gemacht sowie Modifikationen in der Vorgehensweise im Jahr 2012 im Vergleich zu den Arbeiten in 2011 erläutert.

6.2.1 Analyse der flüchtigen Kohlenwasserstoffe Methan bis Hexan

Die Bestimmung der Nachweis- und Bestimmungsgrenzen erfolgte auf der Basis des Signal-Rauschen-Verhältnisses (S/N) sowie der in HAMMER et al. (2012) dargelegten Berechnung der Absolutgehalte in der Salzprobe aus den gemessenen Headspace-Konzentrationen.

Von der Analyse-Software („HP ChemStation“) kann das Höhenverhältnis Signal zu Rauschen der Basislinie bestimmt werden. Für jede Komponente und alle Kalibrationsmessungen bei unterschiedlichen Konzentrationen wurde dieses Verhältnis gegen die Konzentration aufgetragen. Basierend auf einer linearen Regressionsgeraden durch den Nullpunkt wurden die entsprechenden Nachweisgrenzen (bei einem Signal-Rauschen-Verhältnis von 3) sowie die Bestimmungsgrenzen (bei einem Signal-Rauschen-Verhältnis von 9) der einzelnen Komponenten in der Gasphase des Headspaces errechnet [Angabe in Volumen - % im Headspace]. Daran anschließend wurden diese Konzentrationen in entsprechende Nachweis- und Bestimmungsgrenzen bezogen auf die Gehalte im Salz [mg/kg] umgerechnet. Dies erfolgte analog zu der Berechnung der Gehalte im Salz der tatsächlichen Proben aus den Headspace-Konzentrationen. Vereinfachend wurde angenommen, dass die Salzeinwaage 200 g, das Headspace-Volumen 220 ml, das Gesamtvolumen der Analyse-Container 950 ml und der Einlassdruck 1013 mbar betragen. Die ermittelten Bestimmungsgrenzen sind in Tab. 4 aufgeführt.

Tab. 4: Bestimmungsgrenzen der flüchtigen KW Methan bis Hexan.

Methan [mg/kg]	Ethan [mg/kg]	Propan [mg/kg]	i-Butan [mg/kg]	n-Butan [mg/kg]	i-Pentan [mg/kg]	n-Pentan [mg/kg]	i-Hexan [mg/kg]	n-Hexan [mg/kg]
0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003	0,0004	0,0004

6.2.2 Analyse der niedrig siedenden Kohlenwasserstoffe von Heptan bis Decan

Die bei der Analyse der Proben aus dem Q1W verwendete Methode zur Bestimmung der ausgewählten KW n-Heptan bis n-Decan erfuhr eine Modifikation v. a. zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit. Bislang wurde die in 800 mL deionisiertem Wasser gelöste Salzprobe erwärmt, mit anschließender Entnahme aus dem Gasraum des Gefäßes (Headspace). Diese Temperierung wurde durchgeführt, um den Anteil der KW in der Gasphase zu erhöhen, womit die Empfindlichkeit gesteigert wurde. Durch neuerliche Überprüfung wurde jedoch deutlich, dass die Reproduzierbarkeit durch Temperierung bei Raumtemperatur verbessert werden kann (siehe Tab. 5).

Tab. 5: Methoden-Kenndaten für die Messserien im Q1W (2011) und Q1E (2012) im Vergleich. (NG – Nachweisgrenze, BG – Bestimmungsgrenze).

		n-Heptan	Toluol	n-Octan	n-Nonan	n-Decan
Reproduzierbarkeit (n=3)	Alte Methode	19,80%	17,10%	24,60%	-- ²	12,10%
Reproduzierbarkeit (n=4)¹	Neue Methode	13,15%	9,38%	14,29%	9,69%	7,78%
NG [ng/g Salz]³	Alte Methode	0,1	1,0	0,2	0,1	0,3
BG [ng/g Salz]³	Alte Methode	0,5	4,0	1,0	0,2	1,3
NG [ng/g Salz]³	Neue Methode	0,4	1,7	0,3	0,2	0,2
BG [ng/g Salz]³	Neue Methode	1,5	7,1	1,0	0,6	0,7
Korrelation R²	Alte Methode	0,946	0,818	0,861	-- ²	0,999
Korrelation R²	Neue Methode	0,995	0,995	0,998	0,996	0,992

¹ Reproduzierbarkeit (proz. Standardabweichung) wurde mittels eines stabilisierten Öls bestimmt, welches während des Messzeitraumes als interner Standard verwendet wurde.

² War nicht im Standard als Komponente enthalten, wurde jedoch in Proben quantifiziert über gemittelte Responsfaktoren (m) benachbarter n-Alkane.

³ Bestimmung auf Grundlage der Analytgehalte in Blindwertmessungen über den gesamten Messzeitraum, sowie P=5% und vorausgesetzter Analysepräzision von 10%.

Durch Einführung dieser Änderung konnten bessere Reproduzierbarkeiten und Linearitäten erlangt werden (siehe Tab. 5). Allerdings wurden durch diese Maßnahme die Nachweisgrenzen heraufgesetzt, da der Anteil der KW in der Gasphase bei Raumtemperatur entsprechend niedriger ist.

6.2.3 Analyse der höher siedenden Kohlenwasserstoffe zwischen Decan und Tetracontan

Die für die Analyse der höher siedenden KW eingesetzte Methode wurde nicht verändert. Allerdings konnte innerhalb des Messprogramms der Proben aus dem Q1E für dieselbe Methode im Vergleich zu den Arbeiten in 2011 eine niedrigere Bestimmungsgrenze von 0,25 mg/kg Gestein (vormals 0,8 mg/kg Gestein) erreicht werden. Dies kann auf eine verbesserte Routine in der Probenbearbeitung und auf in 2012 durchgeführte Wartungsarbeiten am Gaschromatographen zurückgeführt werden.

6.3 Überblick zu den Bohrungsloktionen im Querschlag 1 Ost

Die Zielsetzung bestand ebenso wie im Q1W darin, ein statistisches Probenraster unabhängig von vorab bekannten Gegebenheiten wie Lithologie der Gesteine oder bereits vorliegenden Befunden zu KW-Gehalten aus früheren Studien anzuwenden. Daher wurden im Q1E die 20 Kurzkern-Probenahmebohrungen über ca. 300 m in etwa

gleichen Abständen angeordnet. Aufgrund bestehender untertägiger Ausbauten (z. B. Abzweig Bohrort 4, Nische im nördlichen Bereich des Q1E) ergaben sich nur wenige Abweichungen. Mit Ausnahme der Bohrung RB670 wurden alle Bohrungen am Oststoß des Q1E durchgeführt, Bohrung RB670 wurde im Bohrort 3.1 gestoßen (siehe Abb. 6). Die Bohrungen liegen wiederum größtenteils im z2HS1, lediglich die Bohrung RB663 im Südsüdosten des Querschlags befindet sich im z2HS3 und die vier Bohrungen RB679 bis RB682 im Nordnordosten des Querschlags sind im z2HS2 gelegen.

In Analogie zur Vorgehensweise in HAMMER et al. (2012) ist die Lage der Bohrungen im Q1E im Folgenden in einer Projektion der Abstände der Bohrendpunkte von der Bohrung RB663 aus auf einer Linie als künstliche Profilmeter dargestellt (Abb. 49). Dies ist keine ortsgenaue Darstellung der Einzelproben, erlaubt aber einen raschen Überblick über z. B. die Verteilung der KW-Gehalte im Q1E. In Graustufen hinterlegt sind jeweils die geologischen Einheiten.

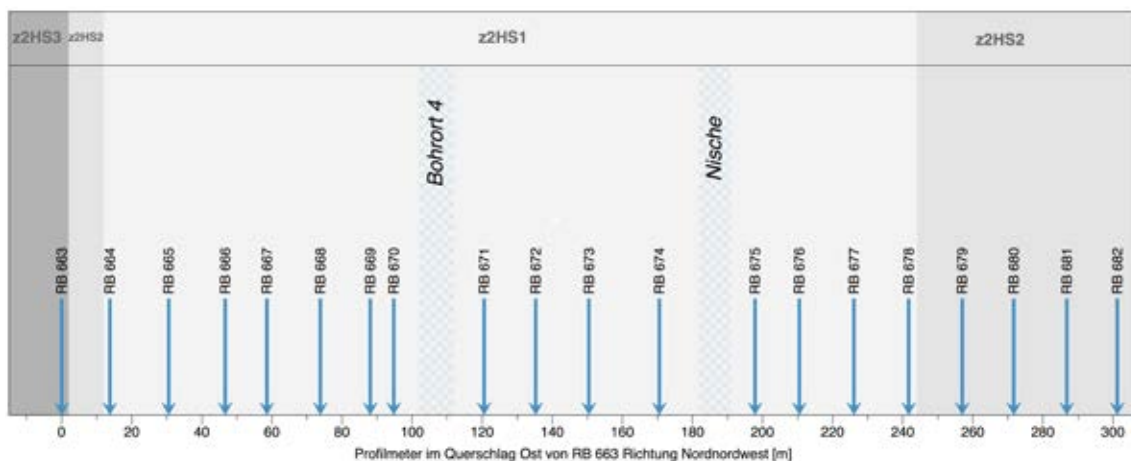


Abb. 49: Darstellung der Kurzkern-Probenahmebohrungen im Q1E entlang einer Linie der Bohrendpunkte, von RB663 ausgehend Richtung Nordnordwest. Blaue Pfeile deuten die Bohrendpunkte des Statistikproben-Datensatzes an.

Insgesamt wurden in der ersten Bohrkampagne im Herbst 2011 (mit jeweils 6 m Bohrungslänge), die von der technischen Kontamination (siehe Kap. 6.1) mit höher siedenden KW betroffen war, 17 Bohrungen mit 85 Einzelproben durchgeführt. In der zweiten Bohrkampagne nach Beseitigung der Kontaminationsquelle und Vertiefung der Bohrungen auf 9,0 m, wurden insgesamt 20 Bohrungen gestoßen und insgesamt 100 Statistikproben gewonnen. Die einzelnen Proben sind in Anhang 31 (Statistikproben aus Intervall 7,5 m - 9,0 m) und Anhang 32 (Proben aus Intervall 4,5 m - 6,0 m) mit DBE-Probenamen, BGR-internen LIMS-Nummern und weiteren Angaben wie z. B. genauem Kernabschnitt und den bestimmten Parametern aufgeführt.

6.4 Ergebnisse der organochemischen Untersuchungen der Probenahme-Kurzbohrungen im Querschlag 1 Ost

Die Summe der KW im Gestein wurde analog den in HAMMER et al. (2012) beschriebenen Verfahren für den Bereich Methan bis Tetracontan (C_1 - C_{40}) ermittelt. In Abb. 50 sind die Werte der Einzelproben aus dem Datensatz Statistikproben Q1E ($n=100$) mit den Werten der Einzelproben der Datensätze Statistikproben Q1W sowie Nachverdichtung Q1W als Anzahl der Proben in einem Konzentrationsbereich (logarithmisch aufgetragen) dargestellt.

Auffällig ist, dass die Medianwerte der KW-Gehalte der drei Datensätze mit 0,31 bis 0,385 mg/kg Gestein sehr ähnlich sind. In der Verteilung der Gehalte im Q1E deutet sich eine etwas breitere Spreizung von Gehalten um den Medianwert an. Für eine detaillierte statistische Auswertung werden im Abschlussbericht die Variationen der Bestimmungsgrenzen zwischen den Untersuchungen im Q1W zu Q1E berücksichtigt. Doch zeigt sich schon hier, dass die Gehalte an KW im Gestein zwischen Q1W und Q1E im Median um deutlich weniger als eine Größenordnung differieren.

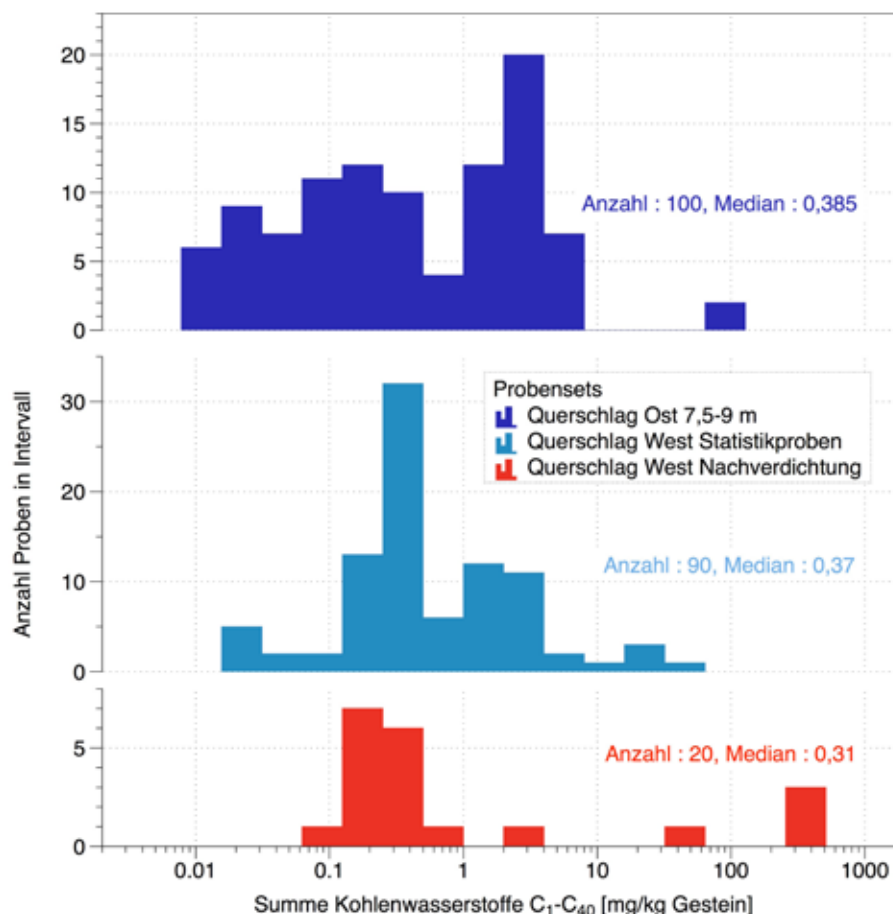


Abb. 50: Häufigkeit der ermittelten Gehalte an KW von Salzgesteinsproben der Kurzkernbohrungen aus den Querschlägen 1 Ost und 1 West. Dargestellt sind die Probenansätze Statistikproben Q1E (7,5 m - 9,0 m) und die beiden Probenansätze Statistikproben und Nachverdichtung aus dem Q1W (siehe HAMMER et al. 2012).

Die räumliche Verteilung der KW-Gehalte in den Hauptsalzproben aus dem Q1E ist in Abb. 51 entlang der künstlichen Profillinie ausgehend von Bohrung RB663 dargestellt. Die Schwankungsbreite der Werte innerhalb einer Bohrung kann ähnlich wie im Q1W mehr als eine Größenordnung ausmachen. Außerdem fällt auf, dass KW-Gehalte über 1 mg/kg Gestein auf Bohrungen beschränkt sind, die im z2HS1 (Knäuelsalz) stehen. Die Bohrungen im z2HS2 (Streifensalz) und z2HS3 (Kristallbrockensalz) weisen alle KW-Gehalte von weniger als 1 mg/kg Gestein auf. Dies stimmt mit den Befunden im Q1W (siehe HAMMER et al. 2012) überein - mit Ausnahme der dort an der Grenze z2HS2/z2HS1 stehenden Bohrung RB644 betragen die KW-Konzentrationen im Gestein ebenfalls weniger als 1 mg/kg. Dabei ist allerdings zu beachten, dass im Vergleich zum z2HS1 für das z2HS2 nur wenige Proben und für das z2HS3 nur eine einzige Probe vorlagen. Die Hauptsalztypen Streifensalz und Kristallbrockensalz sind ausgehend von den Aufschlussbeobachtungen durch sehr seltene und mengenmäßig unbedeutende KW-Vorkommen charakterisiert (BORNEMANN et al. 2008, GERLING et al. 2002, HAMMER et al. 2012). Für eine umfassendere Bewertung der KW-Gehalte in den Hauptsalztypen Streifensalz und Kristallbrockensalz müssen Befunde aus anderen Probenlokalitäten außerhalb der Datensätze Statistikproben der Querschläge 1 West und 1 Ost wie z. B. Bohrort 5.0 in weitergehende Interpretationen einbezogen werden.

KW-Konzentrationen von mehr als 10 mg/kg Gestein wurden im Q1E nur an einer Lokation - RB669 - in zwei Proben bestimmt. Die weitere Interpretation der räumlichen Verteilung der KW-Gehalte in Zusammenschau mit den weiteren salzgeologischen und mineralogisch-geochemischen Ergebnissen des Arbeitspaketes wird im Abschlussbericht vorgenommen.

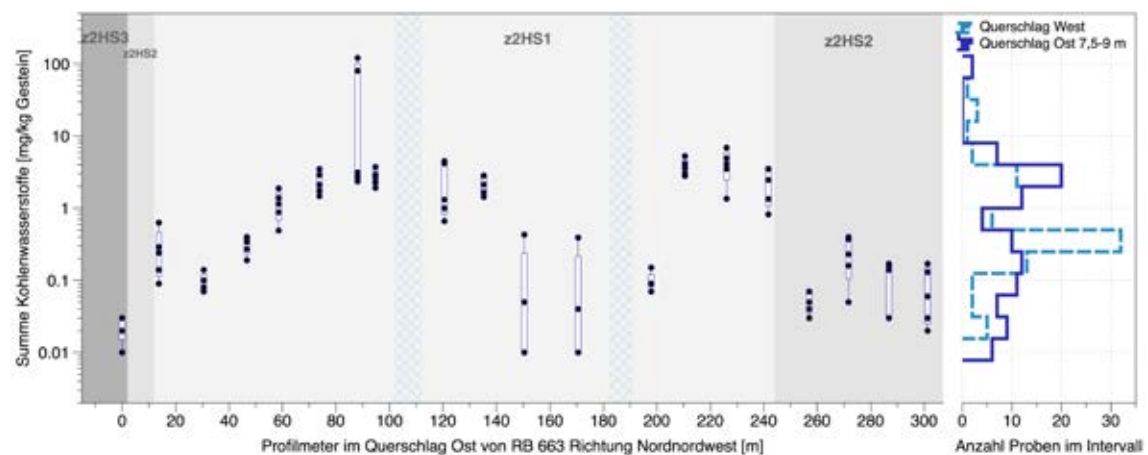


Abb. 51: Darstellung der KW-Gehalte C_1 - C_{40} im Hauptsalz der Proben der Datensätze Statistikproben (7,5 m - 9,0 m) im Q1E (dunkelblau) und der Statistikproben aus Q1W (hellblau gestrichelt) als Whisker-Plots und Einzelproben im Profil sowie in der Häufigkeitsverteilung.

Da sich die technische Kontamination der Bohrkerns aus dem Q1E aus der Bohrkampagne im Herbst 2011 auf höher siedende KW beschränkte (siehe Kap. 6.1), sind die in diesen kontaminierten Proben (4,5 m – 6,0 m) bestimmten Gehalte an gasförmigen bzw. niedrig siedenden KW mit den Gehalten der im Frühjahr 2012 gestoßenen Probenahme-Bohrungsabschnitte (7,5 m – 9,0 m) vergleichbar. Dies ermöglicht umfassendere Aussagen zur Veränderlichkeit der Gehalte der gasförmigen bzw. niedrig siedenden KW im Hauptsalz des Q1E.

In Abb. 52 sind die in den Proben der ersten Bohrkampagne aus dem Bereich 4,5 m - 6,0 m bestimmten Konzentrationen an Methan denen der Statistikproben aus der zweiten Bohrkampagne aus dem Bereich 7,5 m - 9,0 m aus derselben Bohrung gegenübergestellt. Auffällig ist, dass die räumliche Verteilung der Methangehalte im Q1E die der Summe der KW (siehe Abb. 51) klar nachzeichnet. Im Vergleich der Proben aus den Kernabschnitten 4,5 m - 6,0 m mit den Proben aus den Kernabschnitten 7,5 m - 9,0 m wird ersichtlich, dass die Methangehalte häufig weniger als eine Größenordnung voneinander abweichen, doch über den betrachteten längeren Kernabschnitt von 4,5 m - 9,0 m mehr an Variation auftreten kann, als nur in einem 1,5 m-Intervall. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der Bohrung RB669 (7. Bohrung von links in Abb. 52), für die im Kernabschnitt 4,5 m - 6,0 m für alle 5 Proben nur Methangehalte von weniger als 1 mg/kg im Gestein festgestellt wurden. Im Kernabschnitt 7,5 m - 9,0 m wurden für die vorderen drei Proben ebenfalls Methangehalte von weniger als 1 mg/kg Gestein - für die beiden hinteren Proben aber um eine Größenordnung höhere Gehalte, d. h. die mit Abstand höchsten Gehalte im Datensatz bestimmt. Dies zeigt, wie scharf der Übergang zwischen Bereichen geringer und erhöhter KW-Konzentrationen im Gestein erfolgen kann.

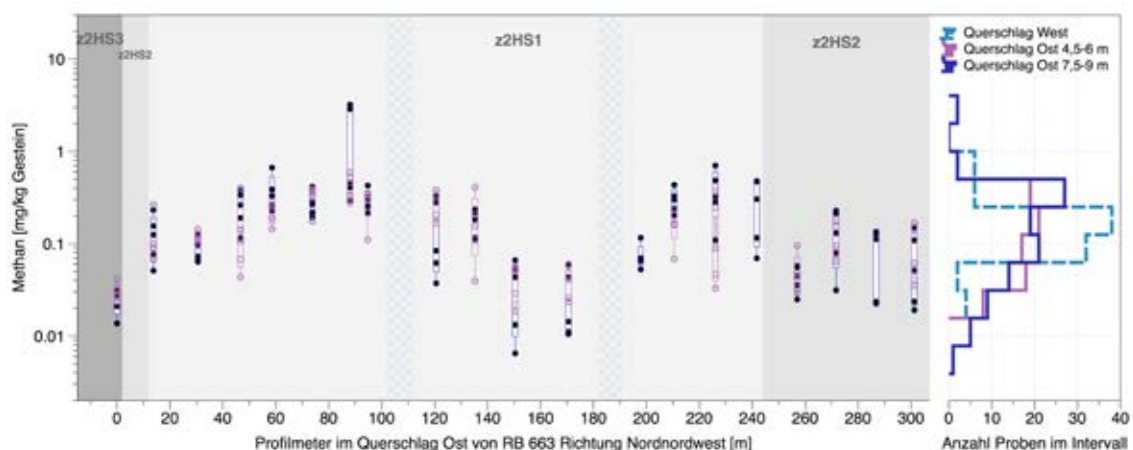


Abb. 52: Darstellung der Methan-Gehalte in den Hauptsalz-Proben der Datensätze Statistikproben (7,5 m - 9,0 m) im Q1E (dunkelblau) sowie der Proben 4,5 m - 6,0 m im Q1E (violett) in der Gegenüberstellung zu den Statistikproben aus Q1W (hellblau gestrichelt) als Whisker-Plots und Einzelproben im Profil sowie in der Häufigkeitsverteilung.

Die molekulare Zusammensetzung der gasförmigen KW ist in Abb. 53 analog zu HAMMER et al. (2012) als Verhältnis der Konzentrationen von Methan zur Summe von Ethan und Propan dargestellt, wiederum getrennt für die Probensätze aus den beiden Intervallen 4,5 m - 6,0 m und 7,5 m - 9,0 m. Aufgrund der teils sehr geringen Konzentrationen von Ethan und Propan unterhalb der Bestimmungsgrenze existieren nicht für alle Proben Werte für diesen Parameter. Deutlich sichtbar sind im Profil des Q1E die Unterschiede zwischen den relativ Methan-reichen Proben bzw. Bohrungen und den relativ Ethan- und Propan-reicheren Proben bzw. Bohrungen. Die Spannweite der Verhältnis-Werte von ca. 1 bis 100 deckt sich mit den Beobachtungen aus dem Q1W. Die im Q1W beobachtete Beschränkung von sehr hohen Werten größer 10 auf die stratigraphische Einheit z2HS2 ist im Q1E nicht gegeben, hohe Werte treten hier auch im zentralen Bereich des z2HS1 auf. Auffällig ist die gute Übereinstimmung der Werte in beiden Datensätzen aus dem Q1E (unterschiedliche Beprobungsintervalle; siehe Kap. 6.1) sowohl innerhalb einer Bohrung als auch in der Klassenauftragung sowie die gegenüber den Daten aus dem Q1W breitere Verteilung der Werte auf die Klassen um den Hauptwert (siehe Abb. 53 rechts).

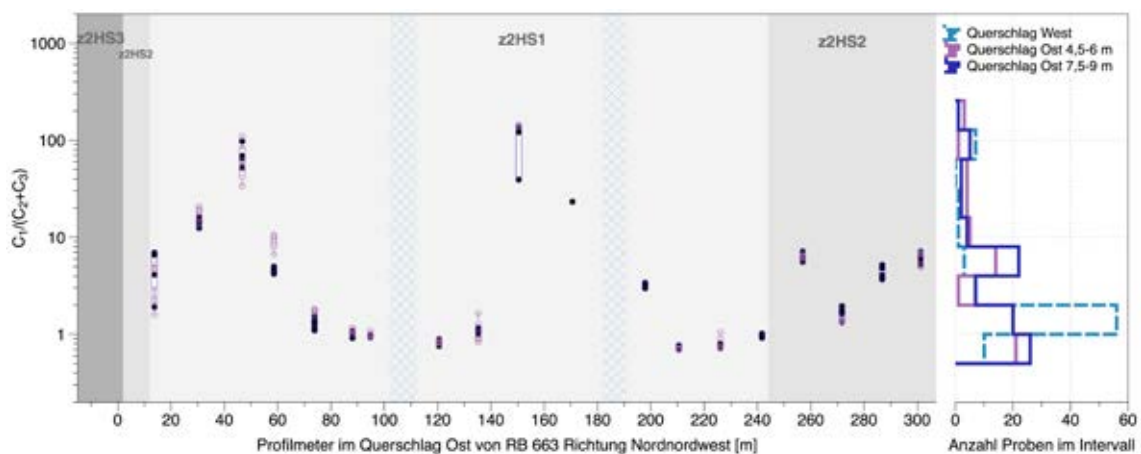


Abb. 53: Darstellung der $C_1/(C_2+C_3)$ -Verhältnisse in den Hauptsalz-Proben im Q1E der Datensätze Statistikproben (7,5 m - 9,0 m; dunkelblau) und im Beprobungsintervall 4,5 m - 6,0 m (violett) als Whisker-Plots und Einzelproben im Profil und in der Häufigkeitsverteilung. Zum Vergleich wurden die Statistikproben aus Q1W (hellblau gestrichelt) in das Histogramm eingezeichnet.

Bei Betrachtung der Werte der Kohlenstoffisotopenzusammensetzung des Methans aus den Proben dieser drei Datensätze (Abb. 54) zeigt sich, dass die Variationsbreite im Q1E deutlich über die im Q1W angetroffene hinausgeht. Allerdings weisen, ähnlich wie im Q1W, die Proben im Q1E mit geringen $C_1/(C_2+C_3)$ -Verhältnissen nahe 1 häufig $\delta^{13}C$ -Werte des Methans zwischen -44 ‰ und -46 ‰ auf. Proben mit deutlich von 1 abweichenden $C_1/(C_2+C_3)$ -Werten zeigen meist auch abweichende $\delta^{13}C$ -Werte des Methans. Die Proben aus den beiden Kernabschnitten von 4,5 m - 6,0 m und 7,5 m - 9,0 m unterscheiden sich meist nicht signifikant.

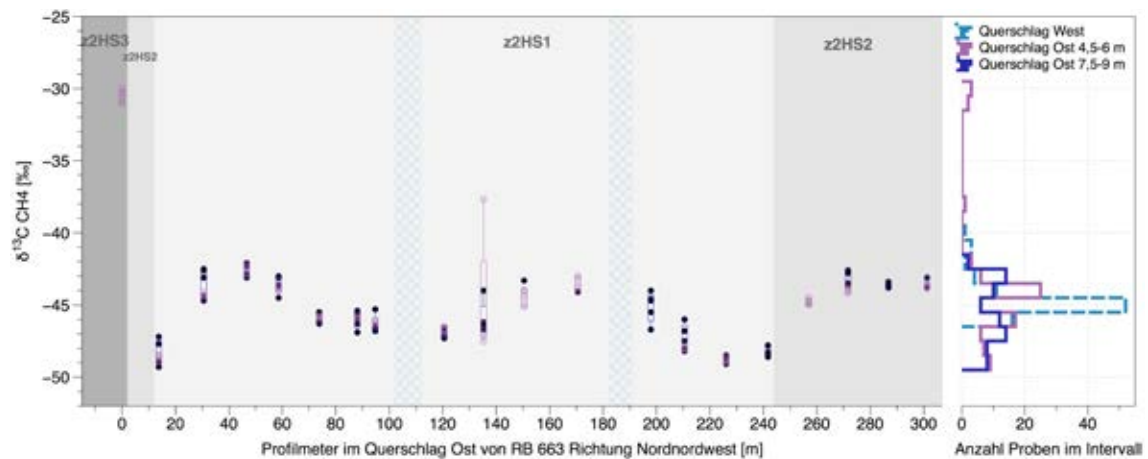


Abb. 54: Darstellung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des Methans in Hauptsalz-Proben der Datensätze der Statistikproben (7,5 m - 9,0 m; dunkelblau) sowie des Beprobungsintervalls 4,5 m - 6,0 m (violett) im Q1E als Whisker-Plots und Einzelproben im Profil sowie in der Häufigkeitsverteilung. Zum Vergleich wurden die Statistikproben aus Q1W (hellblau gestrichelt) in das Histogramm eingezeichnet.

Eine weitergehende Interpretation der Befunde im Hinblick auf eine genetische Zuordnung der KW zu einem oder mehreren Muttergesteinen und im Hinblick auf mögliche Alterationen durch Prozesse nach der KW-Bildung im Muttergestein erfolgt nach Vorliegen der Vergleichsdaten potentieller Muttergesteine im Abschlussbericht des Arbeitspaketes.

7 Untersuchungen zur Kohlenwasserstoff-Führung des Kristallbrockensalzes (z2HS3) in Bohrort 5.0

7.1 Verteilung der Kohlenwasserstoffe in den Aufschlüssen des Bohrortes 5.0

Bei der Auffahrung des im Nordosten des Erkundungsbergwerks Gorleben gelegenen Bohrortes 5.0 (siehe Abb. 70) wurden im z2HS3 (Kristallbrockensalz) UV-aktive, KW-führende Bereiche angetroffen. Dabei handelt es sich um den erstmaligen Nachweis von fluoreszierenden KW im jüngsten Teil des Hauptsalzes, d. h. in der Nähe der z2-Sattel-Flanken.

Anders als die KW-Vorkommen im aufgrund des Salzaufstiegs stark deformierten und homogenisierten Knäuelsalz sind die KW im Bohrort 5.0 – ähnlich denen im Bohrort 1.2 (Streifensalz) – in 1 cm bis 5 cm dünnen Lagen (Abb. 55 bis Abb. 58) angeordnet. Die KW-führenden Bänder im Bohrort 5.0 folgen annähernd parallel der primären, weitgehend erhalten gebliebenen Schichtung der Gesteine (SW-NE), sowie einem in direkter Nachbarschaft gelegenen, boudinierten geringmächtigen Anhydritband (Abb. 57).

Im Bereich des vor der Erweiterung des Bohrortes 5.0 temporär zugänglichen Weststoßes wurde in Nachbarschaft des Anhydritbandes bereichsweise eine etwas größere, flächenhafte Verbreitung von fluoreszierenden KW im Kristallbrockensalz festgestellt (Abb. 56). Diese ist vermutlich auf den geringen Abstand zwischen KW- und Anhydritband und die damit einhergehenden Änderungen im Spannungsregime im Bereich eines sehr hohen Kompetenzkontrastes zurückzuführen. Das Anhydritband selbst weist keine Fluoreszenz auf, sofern es nicht von dem KW-Band direkt tangiert und damit kontaminiert wird.

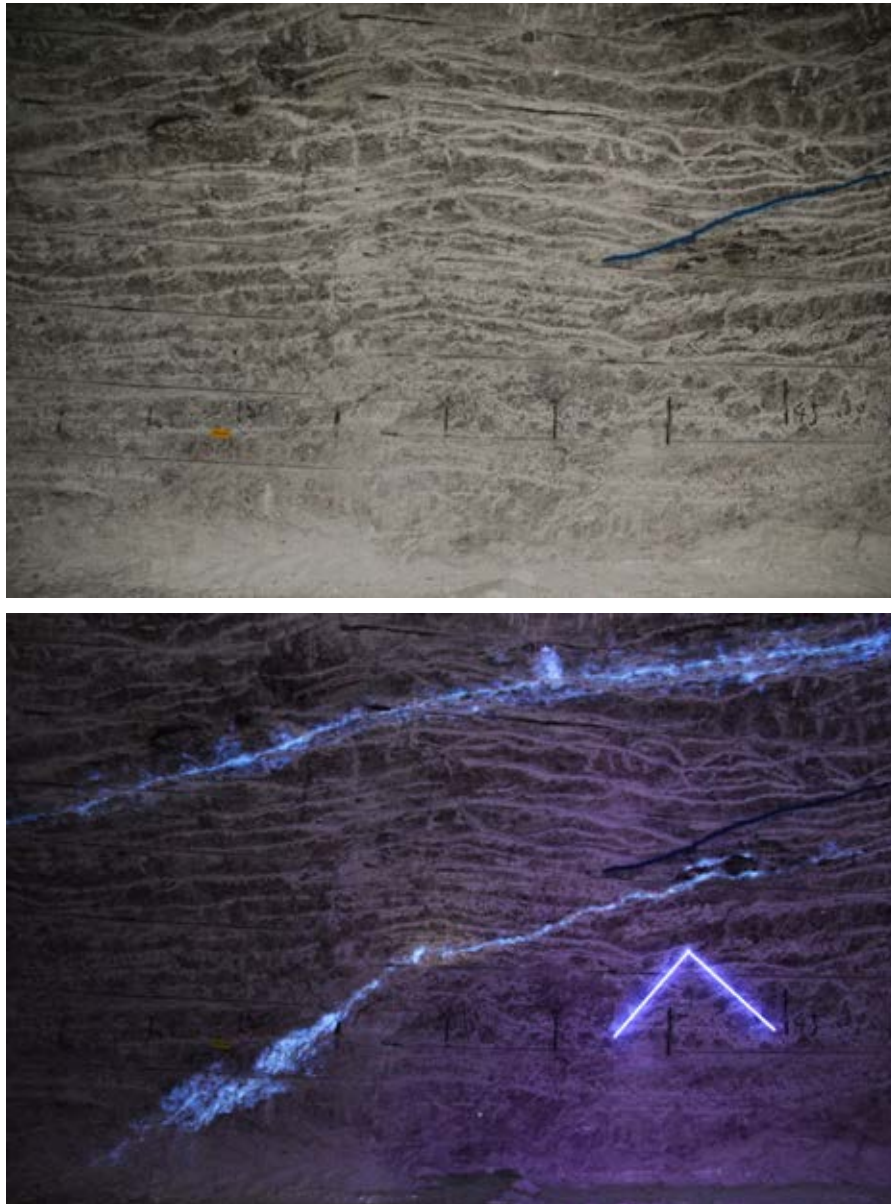


Abb. 55: Annähernd parallel verlaufende KW-Bänder am östlichen Südstoß des Bohrortes 5.0 (vor dessen Erweiterung) bei Kunstlicht (obere Aufnahme) und bei UV-Strahlung (untere Aufnahme). Bei Streckenmeter 46 teilt sich das untere KW-Band kurzzeitig und umfließt ein Anhydritbruchstück (oberhalb des gewinkelten Zollstocks). Das randlich ausgefranste Erscheinungsbild der KW-Bänder ist auf den Beraubungsprozess und damit einhergehende Verschmierungen der KW zurückzuführen (Aufnahmen: DBE).

Nur in einem 2 cm breiten Streifen der Packerbohrung RB701 (Bohrort 5.0; siehe Anhang 29), welche das Anhydritband durchörtert, konnten vereinzelt intrakristalline, würfelförmige Fluideinschlüsse mit fahl bläulich-weißer Fluoreszenz im Anhydritband beobachtet werden.



Abb. 56: Lokal auf den ehemaligen Weststoß des Bohrortes 5.0 beschränkte, größerflächige Verbreitung von KW im Kontaktbereich von KW-Band und Anhydritband unter UV-Strahlung (obere Aufnahme) und bei Kunstlicht (untere Aufnahme). Auffällig sind vor allem das boudinierte Erscheinungsbild des Anhydritbandes und die sichelartige Schliere. Oberhalb der Lutte weist die flächenhafte Verbreitung eine auffällige Keilstruktur auf, die auf zwei Schrämmspuren zurückzuführen ist (untere Aufnahme). Dieser Bereich verdeutlicht, wie die in einem kleinen Band in geringer Menge angetroffenen KW mechanisch über eine größere Fläche verteilt werden (Aufnahmen: DBE).



Abb. 57: Westerweiterung des Bohrortes 5.0 bei Kunstlicht (obere Aufnahme) und unter UV-Strahlung (untere Aufnahme). Die drei KW-Bänder sowie das im Hangenden der KW-Bänder befindliche, boudinierte Anhydritband folgen der Streichrichtung der Salzgesteine von SW-NE (Aufnahmen: DBE).

Für gefügekundlich-mikrostrukturelle sowie geochemische bzw. organochemische Untersuchungen wurden vor der Westerweiterung des Bohrortes 5.0, verteilt über die Stöße und die Firste insgesamt 8 Probenahmepunkte festgelegt (siehe Anhang 33). An jedem Probenahmepunkt wurde ein Steinsalzprofil, bestehend aus 1 bis 4, jeweils bis ca. 1 m langen Steinsalzbändern (Abb. 58) senkrecht zum Streichen der KW-Bänder aus dem Stoß oder der Firste entnommen. Eine ausführliche Dokumentation der Probenahmepunkte und der Ergebnisse der mineralogisch-geochemischen und organochemischen Untersuchungen erfolgt im Abschlussbericht des Arbeitspaketes.

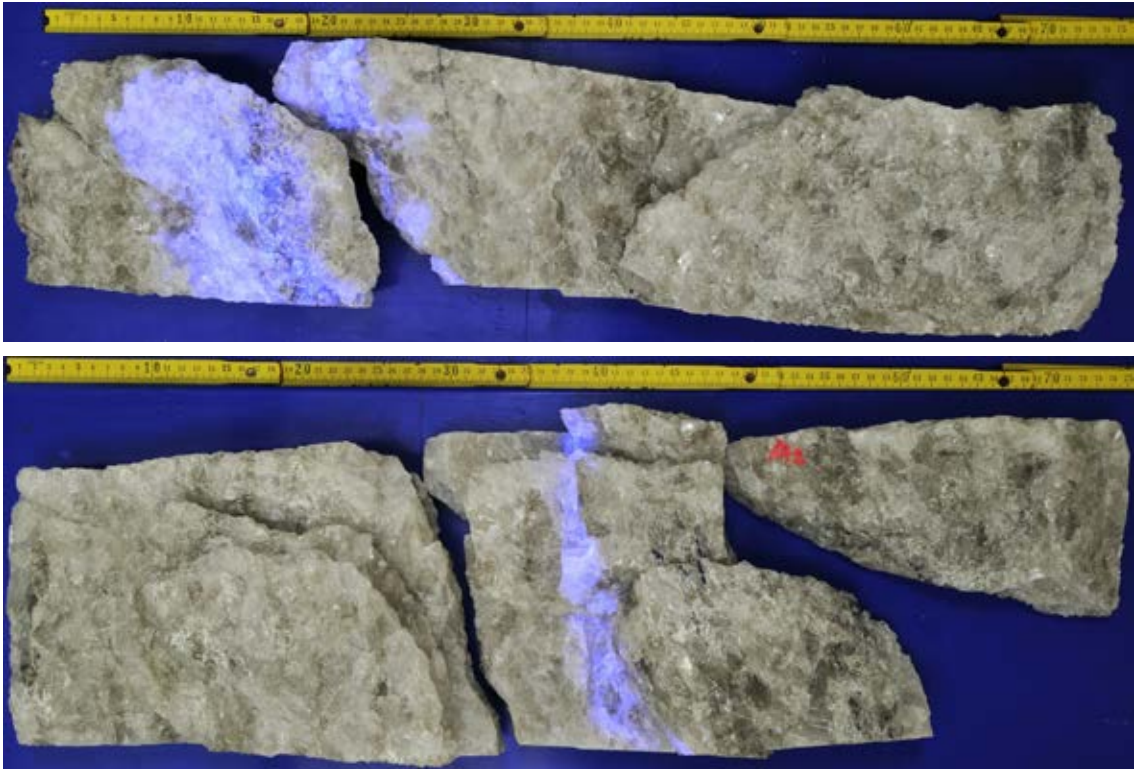


Abb. 58: Probenstreifen aus den Probenfeldern 8 (oben) und 2 (unten) im Bohrort 5.0; Kombinationsaufnahmen aus Aufsicht und UV-Strahlung ($\lambda = 254 \text{ nm}$). Die Streifen wurden jeweils annähernd senkrecht zu einem der beiden KW-Bänder im Bohrort 5.0 mittels Winkelschleifer (Schnitttiefe ca. 10 cm) freigeschnitten und mittels Hammer aus dem Stoß herausgebrochen. Das in beiden Streifen enthaltene und räumlich eng begrenzte KW-Band erscheint in den Aufnahmen durch die KW-Fluoreszenz leuchtend blau.

7.2 **Organogeochemische Untersuchungen an Proben aus dem Bohrort 5.0**

7.2.1 **Sequentielle Extraktion der Kohlenwasserstoff-Phasen an Proben aus dem Profil 2A**

Die im Bohrort 5.0 im Bereich des Kristallbrockensalzes (z2HS3) unterhalb eines nur wenige cm mächtigen boudinierten Anhydritbandes aufgeschlossenen KW-Bänder (siehe Abb. 55 und Abb. 57) wurden für mineralogisch-geochemische und organogeochemische Untersuchungen umfangreich beprobt (Abb. 58). Neben der Bestimmung der Gehalte und molekularen Zusammensetzung der KW und dem Vergleich dieser Daten mit den Angaben für die liegenden Partien des Hauptsalzes (Knäuel- und Streifensalz) hatten die Arbeiten folgende Aufgabenstellungen. Zum Einen dienten die Untersuchungen an zwei Vertikalprofilen über die KW-Bänder dem Studium der Verteilung der KW im Gefüge der Gesteine (mikrostrukturelle Charakterisierung des KW-Bandes und seines Umfeldes)

sowie zur Klärung der Frage, ob es Hinweise für eine sekundäre Verlagerung von KW aus einem strukturell abgegrenzten KW-führenden Bereich in angrenzende Gesteinspartien gibt. Es sollten Erkenntnisse dazu gewonnen werden, ob zusätzlich und unabhängig von einer KW-Verlagerung im Prozess des Salzaufstiegs auch eine spätere KW-Verlagerung durch Migration bzw. Diffusion wahrscheinlich ist.

Um eine Aussage über das Potential einer vorliegenden KW-Phase zur deformationsgetriebenen Umverteilung im Salzgestein zu erhalten, ist es wichtig abzugrenzen, wie hoch der migrationsfähige Anteil der KW-Phase ist, wenn sich Störungen im Gefüge bilden und potentiell eine Migration ermöglichen. Die Fluide feinverteilter intrakristalliner Einschlüsse stehen für eine Migration nicht zur Verfügung, da sie bei Störungen nicht umfassend aufgeschlossen werden. Im Gegensatz dazu können Fluide von miteinander verbundenen Korngrenzen- oder Kluftsystemen bei Störungen leichter mobilisiert werden. Weiterhin ist ungeklärt, ob verschiedenartig mobilisierbare KW-Einschlüsse einer Probe auch Unterschiede in der KW-Zusammensetzung aufweisen. Die für die Proben aus den Probenahme-Kurzbohrungen in den Querschlägen 1 West und 1 Ost entwickelte KW-Bestimmungsmethode liefert zwar eine genaue Gesamtbilanz für die KW von C1 bis n-C40, erlaubt aber keine Aussagen darüber, in welcher Form die KW-Anteile in einer Probe verteilt sind und ob die verschiedenen KW-Einschlusstypen einer Probe durch unterschiedliche KW-Zusammensetzungen charakterisiert sind.

Mit der Methode der sequentiellen Extraktion können Informationen über die Mobilisierbarkeit der KW-Anteile in der Probe erhalten werden. So kann eine Abschätzung erfolgen, welche der möglichen Hauptverlagerungsprozesse (Umlagerung durch Halokinese, spätere Migration oder Diffusion) maßgeblich zur Verteilung der KW im Salzgestein beitragen. Mit Hilfe einer sequentiellen Extraktion kann auch eine qualitative Aussage darüber getroffen werden, wie homogen die molekulare Zusammensetzung der KW innerhalb einer Probe ist. Ob eine homogene oder heterogene Zusammensetzung vorliegt, kann Hinweise auf Quellenunterschiede aber auch auf Fraktionierungsprozesse liefern.

Basierend auf diesen Zielstellungen wurde ein neuer experimenteller Ansatz gewählt, der Aussagen darüber liefern kann, wie leicht die KW-Phase in einer möglichst ungestörten Probe mobilisiert werden kann und ob es je nach potentieller Mobilität der KW-Phase auch Unterschiede in der KW-Zusammensetzung gibt. Zur Charakterisierung der räumlichen Verteilung der KW quer zum fluoreszierenden KW-Band am Stoß des Bohrortes 5.0 (Profil 2A; Abb. 59) und zur Analyse der Mobilisierbarkeit unterschiedlicher KW-Anteile durch Deformationsprozesse wurde die KW-Phase von n-C₁₀ bis n-C₄₀ mit Hilfe einer sequentiellen Extraktion bestimmt.

Der gewählte analytische Ansatz geht davon aus, dass zuerst die ungemahlene Probe extrahiert wird, wobei nur freiliegende Oberflächen und nach außen geöffnete Hohlräume (Korngrenzen, Poren, Mikroklüfte) extrahiert werden können. Ein anschließender Mahlvorgang bricht die Probenstruktur auf und öffnet dadurch, je nach Korngröße des Mahlgutes, einen Teil der vorher geschlossenen Bereiche, die anschließend extrahiert werden können. Der noch im Mahlgut verbliebene KW-Anteil, dessen Zugänglichkeit nicht durch den Mahlvorgang erreicht werden konnte, wird durch das Auflösen der Probe in Wasser und durch Extraktion der erhaltenen Lösung bestimmt. Diese schrittweise Extrahierbarkeit der KW-Anteile wird dabei als Maß für die Mobilisierbarkeit betrachtet.

Die Proben für die Untersuchungen entstammen dem „Profil 2A“, das am Nord-Stoß des Bohrortes 5.0 gewonnen wurde (Abb. 59). Das Profil bestand aus drei Teilstücken, die in Folie eingeschweißt im Labor angeliefert wurden. Die Profilabschnitte wurden mittels Bandsäge so zugeschnitten, dass zusammengesetzt ein 54 cm langer, etwa 4,5 cm mal 2 cm messender Probenkörper zur Beprobung vorlag. Die streifenförmige Probe wurde zur Vorbereitung der Extraktion von Hand in maximal 2 cm breite Stücke zersägt. Aus dem 54 cm langen Profil wurden 32 Teilproben gewonnen (Schema siehe Abb. 59). Von diesen Teilproben wurden 18 Proben zur Extraktion ausgewählt (siehe Tab. 6). Das fluoreszierende Band konnte wegen seiner uneinheitlichen Ausdehnung und Lage sowie der Brüchigkeit des Gesteins nicht klar abgegrenzt beprobt werden. In dem fluoreszierenden Bereich war das Salzgestein spröde, so dass hier beim Zerteilen keine ganz intakten Gesteinsquader sondern Gesteinsbruch erhalten wurde.

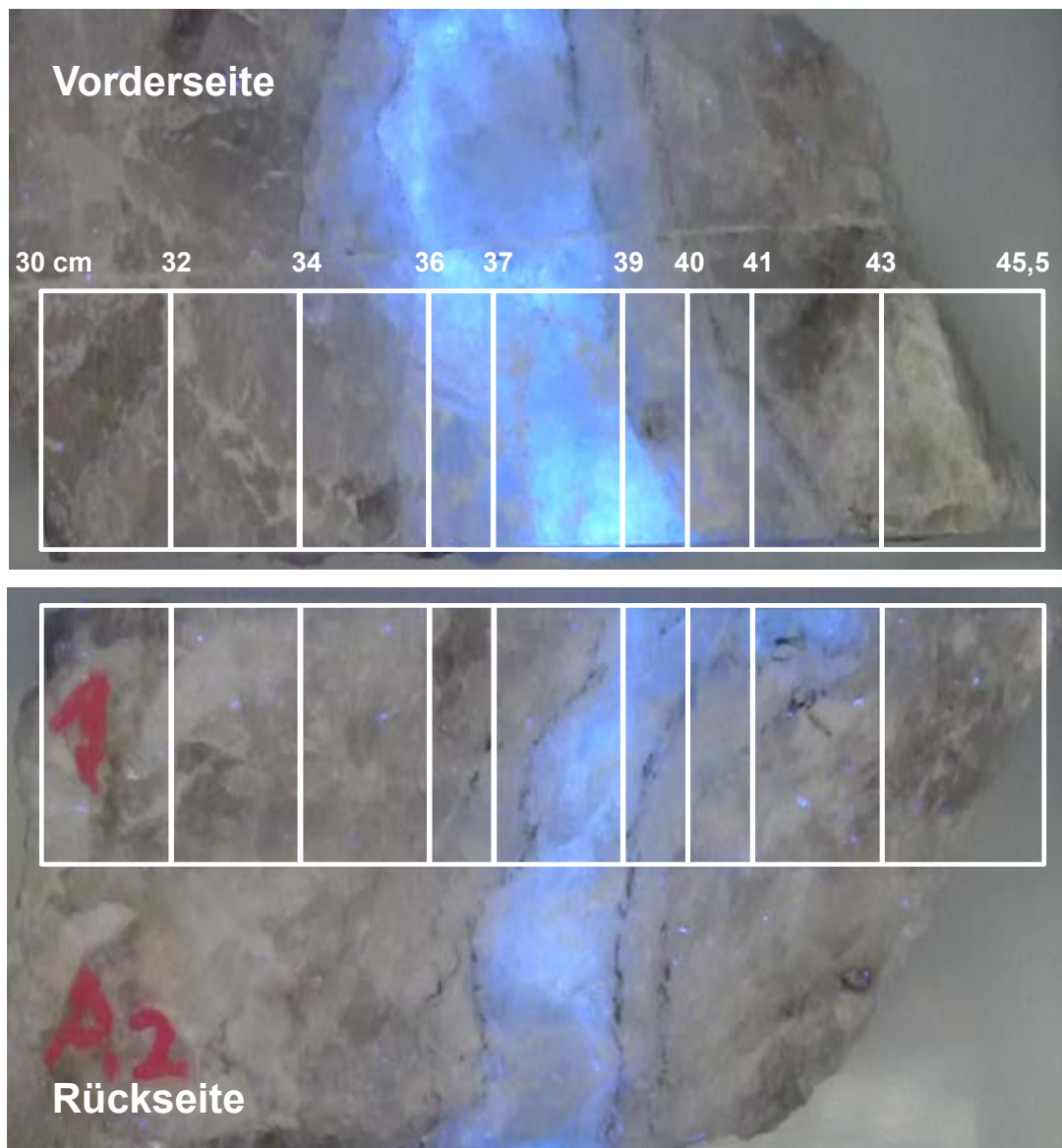


Abb. 59: Beprobungsschema für das Profil 2A (mittlerer Profilabschnitt) aus Bohrort 5.0 im Nahbereich des fluoreszierenden KW-Bandes.

Zur Untersuchung wurde eine sequentielle Extraktion der Proben in vier Schritten durchgeführt. Der erste und zweite Extraktionsschritt erfolgten an der ungemahlene Probe mittels Dichlormethan in geschlossenen Druckgefäßen an dem Extraktionsautomaten Dionex ASE350 bei 100 bar Druck und 60°C bzw. 90°C. Im dritten Schritt wurde das Salz 15 min in einer Fritsch-Mörsermühle feingemahlen und wiederum in der ASE350 bei 90°C extrahiert. Im vierten Schritt wurde das feingemahlene Salz in ein 250 ml Schraubdeckelglas überführt, mit 150 ml deionisiertem Wasser und 75 ml destilliertem iso-Hexan versetzt und dann 30 min auf dem Schütteltisch extrahiert. Die jeweils gewonnenen Extrakte wurden am Gaschromatographen auf die Summe der KW (n-C₁₀ bis n-C₄₀) untersucht. Die Ergebnisse der einzelnen Extraktionsschritte sind in Tab. 6 zusammengefasst.

Tab. 6: Darstellung der Probenpositionen im Beprobungsfeld 2A und der KW-Gehalte, ermittelt über die sequentielle Extraktion (Extraktionsschritte I bis IV siehe Text). „n.n.“ = nicht nachgewiesen (< 0,25 mg/kg).

LIMS-Nr.	Relativ von links nach rechts		KW-Gehalt n-C ₁₀ bis n-C ₄₀			
	"obere Probtiefe" [cm]	"untere Probtiefe" [cm]	ungemahlen I +II [mg/kg]	Mahlgut III [mg/kg]	Lösung IV [mg/kg]	Gesamt [mg/kg]
1207808	0	2	n.n.	<0,5	n.n.	<1,0
1207811	6	8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1207814	12	14	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1207817	18	20	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1207819	22	24	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1207821	26	28	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1207823	30	32	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1207824	32	34	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1207825	34	36	n.n.	<0,5	0,5	<1,0
1207826	36	37	1,6	3,5	2,7	7,8
1207827	37	39	7,4	15,3	13,5	36,2
1207828	39	40	26,6	59,5	44,7	130,8
1207829	40	41	12,5	21,8	14,8	49,1
1207830	41	43	0,8	1,4	n.n.	2,2
1207831	43	45,5	<0,5	0,5	n.n.	<1,0
1207835	44	46	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1207837	48	50	n.n.	0,5	n.n.	<0,5
1207838	50	52	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Die Extraktionsschritte I und II erfolgten an der ungemahlene Probe und wurden zusammengefasst. Aufgrund von Blindwertuntersuchungen wurde die Bestimmungsgrenze für die einzelnen Extrakte bei 0,5 mg/kg und die Nachweisgrenze bei 0,25 mg/kg festgelegt. Bei dem ersten Extraktionsschritt mit 60°C wurden erhöhte Hintergrundwerte mit einem nicht zuzuordnenden KW-Muster ermittelt. Da es sich hier um Proben handelte, die am

Stoß gewonnen wurden und längere Zeit der Grubenluft ausgesetzt waren, muss davon ausgegangen werden, dass eine KW-Kontamination z. B. durch die Bewetterung der Grubenbaue erfolgen konnte. Zur Korrektur wurde bei diesem Extraktionsschritt generell ein Blindwert von etwa 0,8 mg/kg abgezogen.

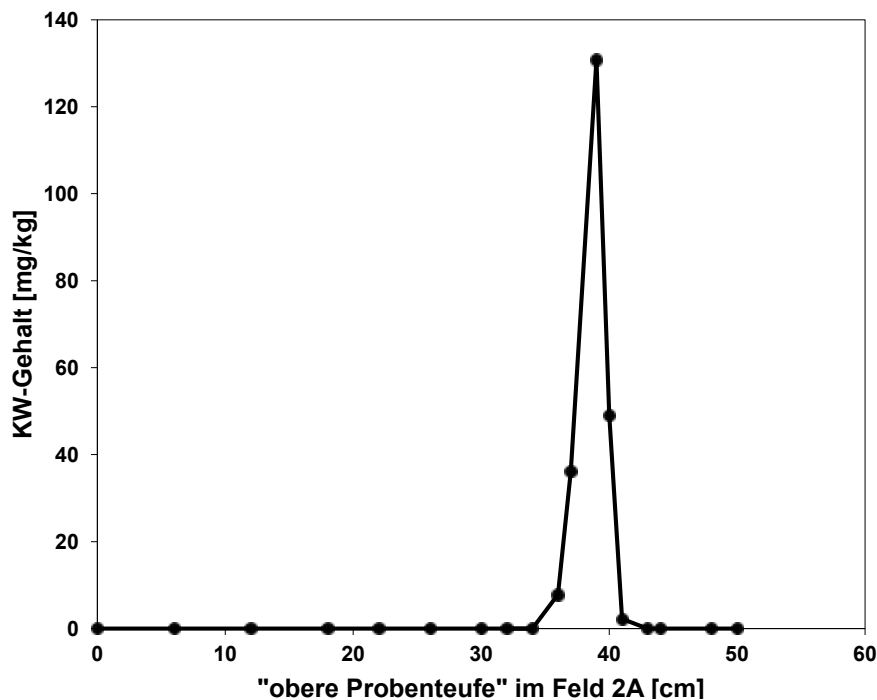


Abb. 60: Verteilung der Gesamt-KW-Gehalte im Profil 2A im Bohrort 5.0 (auf der Abszisse ist die Länge des Profils über das fluoreszierende KW-Band an der Aufschlusswand dargestellt).

Der Verlauf der Kurve der Gesamt-KW-Gehalte im Profil 2A weist nur in fünf Proben in einem Bereich von 7 cm erhöhte KW-Gehalte auf (Abb. 60). Innerhalb dieses Bereiches wird zentral ein Spitzenwert beim Gesamtgehalt von etwa 130 mg/kg erreicht. Die KW-Gesamtgehalte fallen nach beiden Seiten jeweils in einem Streifen von 3 cm deutlich ab, d. h. innerhalb einer Distanz von 3 bis 5 cm von der Probe mit dem höchsten Gehalt sind die Gesamt-KW-Gehalte auf Spuren von kleiner 1 mg/kg gesunken. Auf größerer Distanz wurden vereinzelt Spuren von 0,5 mg/kg oder weniger nachgewiesen, die keinem typischen Ölmuster zugeordnet werden und daher nicht direkt mit dem Öl-haltigen Bereich in Verbindung gebracht werden können. Eine Verteilung der Öl-typischen Gehalte über den fluoreszierenden Bereich hinaus konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Einzelergebnisse der sequentiellen Extraktion zeigen für den fluoreszierenden Bereich ein weitgehend einheitliches Bild (Abb. 61), abgesehen von der Probe mit dem niedrigsten Gesamtgehalt, bei der in der gelösten Probe keine KW nachgewiesen wurden. Aus den ungemahlten Proben sind KW-Anteile zwischen 20-25 % extrahierbar. Aus den gemahlten Proben wurden KW-Anteile zwischen 42-45 % extrahiert und es

verblieben KW-Anteile zwischen 30-37 %, die erst aus den gelösten Proben extrahiert wurden. Damit sind in den untersuchten Proben ca. 75-80 % der vorkommenden KW (trotz Störung durch den Beprobungsvorgang) im ersten Extraktionsschritt nicht extrahierbar bzw. nur bei sehr starker mechanischer Zerkleinerung oder Auflösung der Gesteine aus dem Gesteinsverbund lösbar.

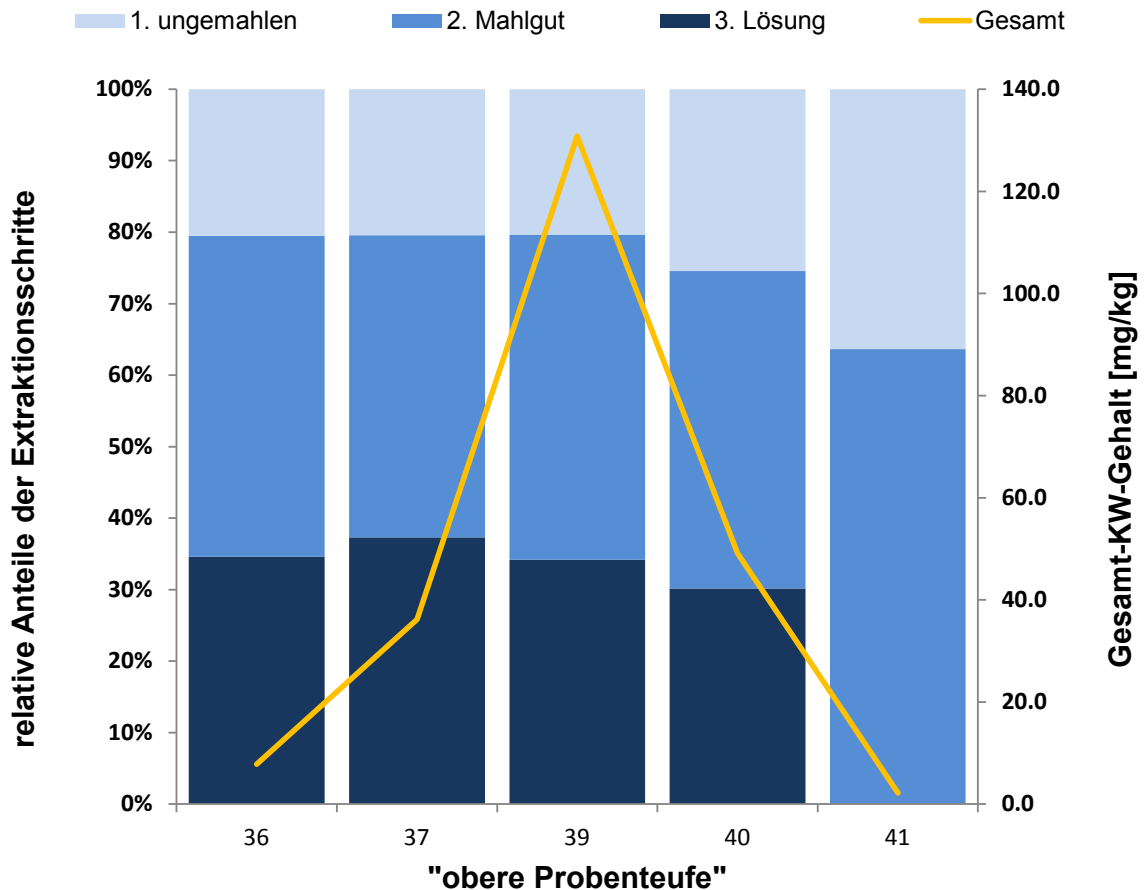


Abb. 61: Änderung der relativen Anteile der in den einzelnen Extraktionsschritten nachgewiesenen KW in Anhängigkeit von der Lage der Proben im Profil bzw. von den Gesamt-KW-Gehalten.

In Abb. 62 sind beispielhaft die Chromatogramme der aus Probe 1207828 (Profilabschnitt zwischen 39 cm und 40 cm) in vier Extraktionsschritten gewonnenen KW-Anteile proportional zu ihrem Anteil dargestellt. Die molekulare Zusammensetzung der KW-Phasen ist von n-Alkanen dominiert und entspricht im Typus einem natürlichen Erdöl. Auffällig ist der geringe Anteil der niedrig siedenden KW-Fraktion kleiner n-C₁₄. Bei den ersten drei Extrakten kann dies durch einen methodisch bedingten Abdampfverlust hervorgerufen worden sein. Eine derartige Erklärung ist nicht bei der Extraktion der gelösten Probe möglich, da hier ein schonendes Verfahren angewendet wurde. Da die Proben vom Stoß gewonnen worden sind, ist ein Abdampfverlust der aus ungemahlene Gesteinsproben extrahierbaren KW-Phase schon vor der Probenahme sehr wahrscheinlich. In dem Extrakt III kann ein Abdampfverlust durch den Mahlvorgang verursacht worden sein.

In dem Extrakt IV ist ein solcher Abdampfverlust auszuschließen. Damit deutet die in den Extrakten IV gefundene Abnahme der leichtflüchtigen Anteile auf einen natürlichen Verlust der leichtflüchtigen Anteile hin. Eine weitere Auffälligkeit ist der relativ geringe Anteil der n-Alkane größer n-C₃₀ in der Extraktionsstufe IV (gelöste Probe). Ein selektiver Verlust dieser Anteile ist unwahrscheinlich, da bei ihnen von einer geringeren Mobilität ausgegangen werden muss. Ob es sich bei diesem Effekt um eine selektive Einlagerung des mittelflüchtigen Anteils handelt, ist mit den vorliegenden Daten allein nicht zu klären.

Im vorliegenden Profil wurde eine engräumige Verbreitung der KW-Anteile mit deutlich abfallenden Gehalten zum Randbereich des KW-Bandes festgestellt. Die tatsächliche KW-Verbreitung könnte noch geringer sein, allerdings lässt die Auflösung der Beprobung keine genauere Aussage zu. Hinweise auf eine maßgebliche Verlagerung von KW-Anteilen durch eine spätere, sekundäre Migration senkrecht zum KW-Band wurden nicht gefunden. Die in der Extraktionsstufe IV nachgewiesenen Verluste leichtflüchtiger KW-Anteile deuten auf eine mögliche Abreicherung hin, sodass das gefundene KW-Muster möglicherweise ein fraktioniertes Restöl darstellt.

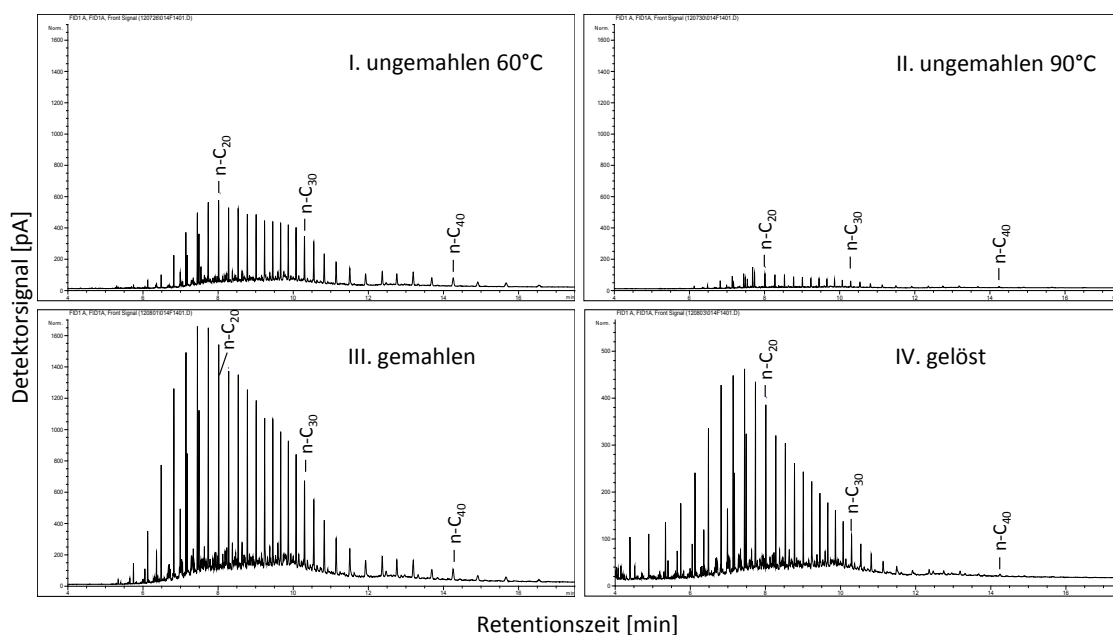


Abb. 62: Vergleichende Darstellung der Chromatogramme der KW-Extrakte aus den vier Extraktionsschritten (Probe 1207828, Bohrort 5.0, Profil 2A, Profilabschnitt zwischen 39 cm und 40 cm).

Ein Vergleich von Ergebnissen der sequentiellen Extraktion von unterschiedlichen Proben erfordert eine weitgehend identische Durchführung der Extraktionsschritte, insbesondere der Mahlvorgang muss möglichst gleichartig durchgeführt werden. Bisher wurde nicht untersucht, auf welche mittlere Korngröße der Mahlvorgang die Proben zerkleinert hat. Dies soll nachfolgend beispielhaft an Rückstellproben bestimmt werden. Durch den

Mahlvorgang kann es zu einem KW-Minderbefund durch Anhaftungen an der Oberfläche der Mühle kommen. Da die Oberfläche der gemahlten Probe vielfach höher ist als die der Mühle, ist ein maßgeblicher Effekt nicht zu erwarten. Auch dies soll nachfolgend bestimmt werden.

7.2.2 Bestimmung der Kohlenwasserstoff-Gehalte von C₁ bis n-C₄₀ an einzelnen Gesteinsproben aus dem Bohrort 5.0

Die Probenkörper wurden aus den Probennahmefeldern 1/C2 und 6/A im Bohrort 5.0 entnommen (siehe Anhang 33). Jeder Probenkörper wurde in drei Segmente geteilt, aus denen jeweils eine Probe entnommen wurde. Die sechs Proben wurden anschließend mit dem Messprogramm für die Proben aus den KW-Probenahme-Kurzkernbohrungen untersucht, um die KW-Zusammensetzung von C₁ bis n-C₄₀ zu bestimmen.

Die Ergebnisse der KW-Bestimmungen von C₁ bis n-C₄₀ an den Proben aus den Feldern 6A und 1/C2 sind in Tab. 7 dargestellt. Die Proben aus dem Feld 1/C2 weisen relativ einheitliche KW-Gesamtgehalte von 68,9 mg/kg bis 86,1 mg/kg auf. Im Feld 6A liegen die Werte zwischen 36,7 mg/kg und 83,9 mg/kg. Alle Proben zeigen im Gaschromatogramm eine weitgehend gleichartige molekulare Zusammensetzung, die einem natürlichen Erdöl entspricht. In der Kettenlängenverteilung der n-Alkane sind die Anteile der höheren Homologen ebenso wie die Anteile der niedrigeren Homologen <n-C₁₀ bis <n-C₁₄ relativ gering, das Maximum liegt zwischen n-C₁₆ und n-C₁₈ (siehe Abb. 63).

Tab. 7: Darstellung der Untersuchungsergebnisse zu den KW-Gehalten C₁-C₄₀ in den Proben aus den Beprobungsfeldern 6A und 1/C2 (Bohrort 5.0).

Probenbezeichnung		Masse Probe [g]	Fast-RGA								
LIMS-Nr.	Einsender		Methan	Ethan	Propan	i-Butan	n-Butan	i-Pentan	n-Pentan	i-Hexan	n-Hexan
			[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
1201873	Feld 6A, Segment 1/2 A	201,0	0,4340	0,1870	0,2771	0,1651	0,2427	0,1924	0,1631	0,1571	0,2182
1201874	Feld 6A, Segment 2/3 A	205,3	0,7999	0,3252	0,4245	0,2117	0,3120	0,2369	0,2030	0,1831	0,2461
1201875	Feld 6A, Segment 0/1 A	204,7	1,5052	0,6399	0,9215	0,4894	0,7158	0,5512	0,4665	0,4285	0,5735
1201876	Feld 1,C2 1b	205,2	0,2425	0,1314	0,1587	0,0733	0,1272	0,1141	0,1174	0,1114	0,1623
1201877	Feld 1,C2 1a	197,5	0,5470	0,2554	0,2984	0,1568	0,2668	0,2368	0,2325	0,2335	0,3486
1201878	Feld 1,C2 1c	189,3	0,0381	0,0160	0,0315	0,0231	0,0490	0,0641	0,0709	0,0789	0,1180

Probenbezeichnung		HS-GC-FID					GC-FID	GC-irMS			
LIMS-Nr.	Einsender	n-Heptan	Toluol	n-Octan	n-Nonan	n-Decan	Summe >C ₁₀ C ₄₀	Summe C ₁ -C ₄₀	δ ¹³ C CH ₄	δ ¹³ C C ₂ H ₆	δ ¹³ C C ₃ H ₈
		[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[‰]	[‰]	[‰]
1201873	Feld 6A, Segment 1/2 A	0,1423	0,1646	0,1598	0,1161	0,0486	42,60	45,3	-42,7	-27,0	-24,8
1201874	Feld 6A, Segment 2/3 A	0,1899	0,3044	0,2028	0,1386	0,0632	32,90	36,7	-42,3	-26,5	-24,6
1201875	Feld 6A, Segment 0/1 A	0,2340	0,3068	0,2465	0,1602	0,0768	76,00	83,3	-42,9	-27,1	-24,9
1201876	Feld 1,C2 1b	0,2208	0,3324	0,1425	0,1073	0,0428	66,80	68,9	-43,9	-28,4	-25,1
1201877	Feld 1,C2 1a	0,3312	0,5737	0,3584	0,2309	0,0837	81,90	86,1	-41,5	-27,6	-24,9
1201878	Feld 1,C2 1c	0,0911	0,1155	0,1133	0,0706	0,0305	79,50	80,4	-41,7	-27,4	-25,3

Im Vergleich mit den Proben mit erhöhten KW- Gehalten (>10 mg/kg) aus dem Q1W und Q1E sind Unterschiede in der molekularen Zusammensetzung feststellbar. Zu beobachten ist ein geringerer Anteil der Komponenten n-C₁₀ bis n-C₁₄ in der n-Alkane-Verteilung der KW-Proben aus dem z2HS3 (Bohrort 5.0). Da die Proben nicht aus einem ungestörten Bereich gewonnen wurden, sondern direkt am Stoß, ist ein Abdampfverlust eine mögliche Ursache hierfür. Die Untersuchungen am Profil 2A zeigen (siehe Kap. 7.1), dass aus den Proben eines solchen KW-Bandes nur Anteile von bis zu 25 % direkt extrahierbar und damit einem möglichen Abdampfverlust zugänglich waren, der selbst wiederum nur einen Teil der 25 % darstellen kann. Daher kann angenommen werden, dass die geringere Präsenz der Komponenten n-C₁₀ bis n-C₁₄ nicht allein artifiziell entstanden ist, sondern auch ein probentypisches Charakteristikum darstellt. Diese Annahme wird darüber hinaus durch die sehr ähnliche charakteristische Kettenlängenverteilung in dem KW-Anteil im Extrakt IV der sequentiellen Extraktion im Profil 2A gestützt, der sicher keinen signifikanten Abdampfverlust erlitten hat (siehe Abb. 62 und Abb. 63).

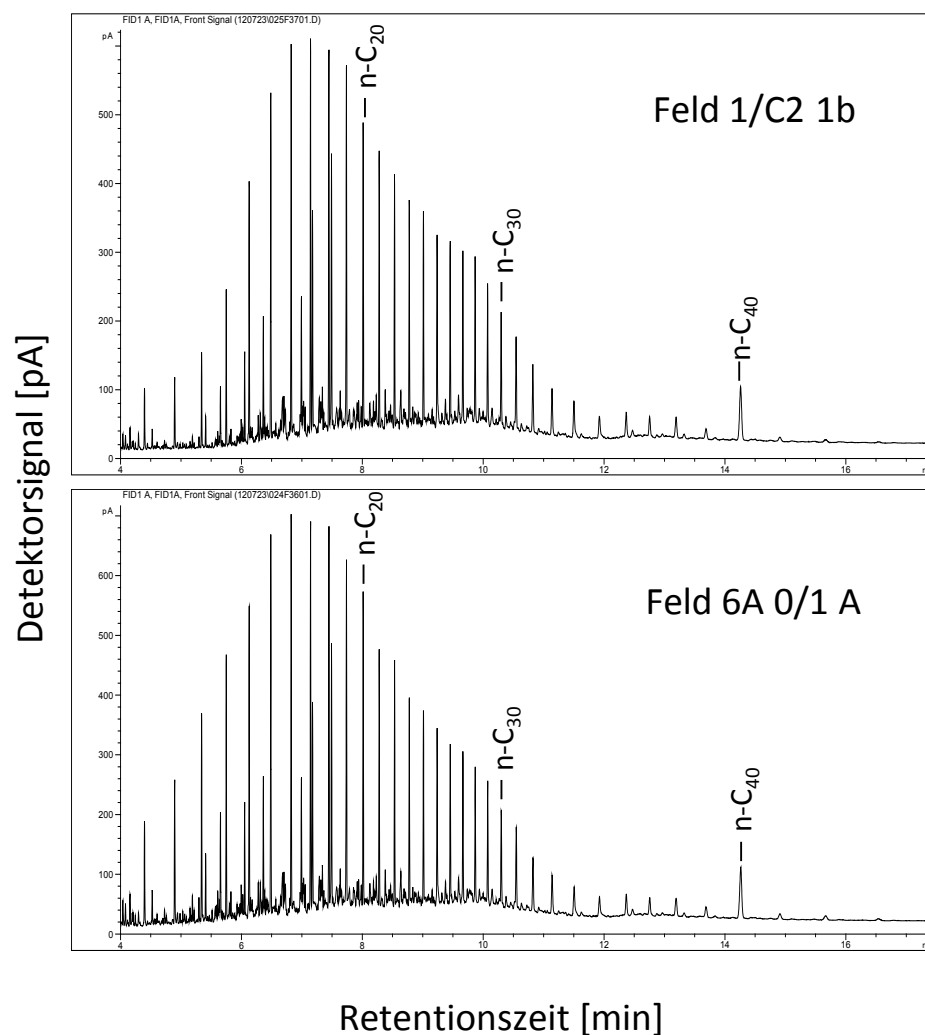


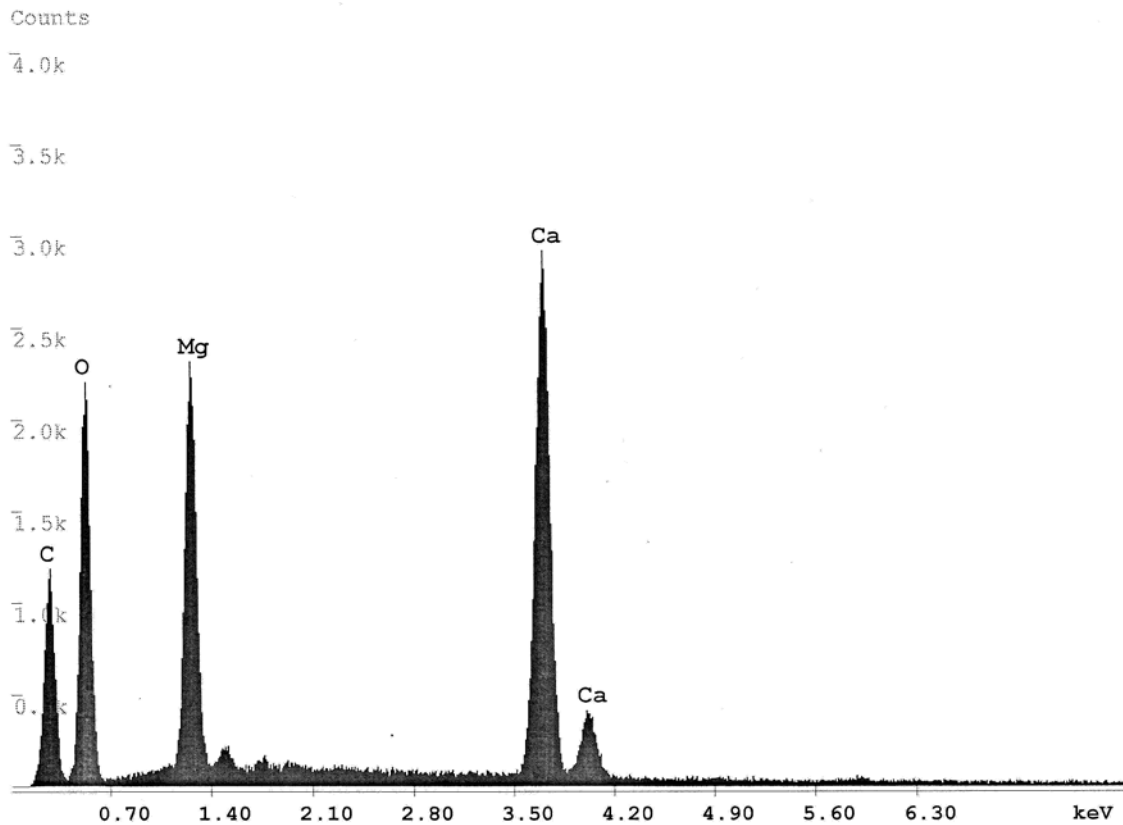
Abb. 63: Darstellung der Chromatogramme n-C₁₀ bis n-C₄₀ für zwei Proben aus den Feldern 1/C2 und 6A.

8 Untersuchungen der akzessorischen Minerale in den Kohlenwasserstoffführenden Hauptsalzproben aus dem Querschlag 1 West mittels Rasterelektronenmikroskop

In Fortsetzung der Beobachtungen an Dünnschliffen aus dem Q1W, in denen akzessorische Beimengungen u. a. von Karbonat (Dolomit), Pyrit, Cölestin und Quarz festgestellt wurden, erfolgten an zwei, in Voruntersuchungen als geeignet und repräsentativ bewerteten Proben (jeweils eine aus den Bohrungen RB648 und RB659) rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an den durch Auflösung der Salzgesteine gewonnenen Lösungsrückständen. Zu diesem Zweck wurde aus den Bohrungen RB648 und RB659 jeweils ein Kernsegment von 200 g zu Testzwecken vollständig in bi-destilliertem Wasser aufgelöst, um die unlöslichen Minerale schonend freizulegen und anzureichern. Insbesondere wurden die aus dem Salzgestein freigesetzten Karbonate und Pyrite im Hinblick auf deren Eignung für isotopengeochemische Analysen eingehend untersucht, um mögliche Schädigungen an den Mineralen durch den Auflöseprozess der Steinsalzmatrix identifizieren bzw. ausschließen zu können. Zu diesem Zweck wurden aus dem unlöslichen Rückstand unter dem Binokular Kristalle der jeweiligen Fraktionen herausgepickt, auf Leit-Tabs fixiert und im Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) hinsichtlich Lösungsspuren untersucht. Die im Ergebnis der Lösungsversuche erhaltene Tonfraktion wird z. Zt. phasenanalytisch untersucht.

8.1 Ergebnisse der Untersuchungen mittels ESEM

Die hypidio- bis idiomorphen (vereinzelt xenomorphen) und in den Dünnschliffen bislang immer nur vereinfacht als „Karbonat“ bezeichneten Kristalle konnten in Messungen mit dem energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-Detektorsystem (EDX-Messungen) als Dolomit (Abb. 64) bzw. als gelegentlich auftretender, magnesiumreicher Calcit identifiziert werden. Reine Calcit-Kristalle konnten in den Proben nicht nachgewiesen werden. Die Dolomitkristalle erscheinen im ESEM entweder als idiomorphe Einkristalle mit gut ausgebildeten Kristallflächen (Abb. 65 A) oder als Aggregate (Abb. 65 B & C). Die Kristallflächen sind glatt (Abb. 65 B) bis oberflächlich leicht porös (Abb. 65 A) oder bereichsweise löchrig (Abb. 65 D), in Folge der weggelösten, ehemals angrenzenden Halit- und Anhydritkristalle. Gelegentlich sind mit den Dolomiten verwachsene hypidio- bis idiomorphe Quarz- (Abb. 65 A) bzw. Pyritkristalle (Abb. 65 C) zu beobachten. Vereinzelt treten Dolomitkristalle mit einem mürben, orangefarbenen bis rötlichbraunen Überzug aus Eisenoxiden/-hydroxiden auf (Abb. 66), deren Mineralspezifikation mittels EDX nicht näher zu bestimmen ist.



Element	Wt %	At %
C K	20.42	29.90
O K	47.84	52.59
MgK	12.59	9.11
CaK	19.16	8.41
Total	100.00	100.00

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	1823.19	30.68	1.17	59.43
O K	3670.53	65.22	0.83	56.28
MgK	4202.66	202.90	0.79	20.71
CaK	6838.41	167.15	0.61	40.91

Abb. 64: EDX-Plot eines Dolomitkristalls (Abb. 65 A) aus einer Probe der KW-Bohrung RB648 (Teufe 4,01 m bis 4,10 m).

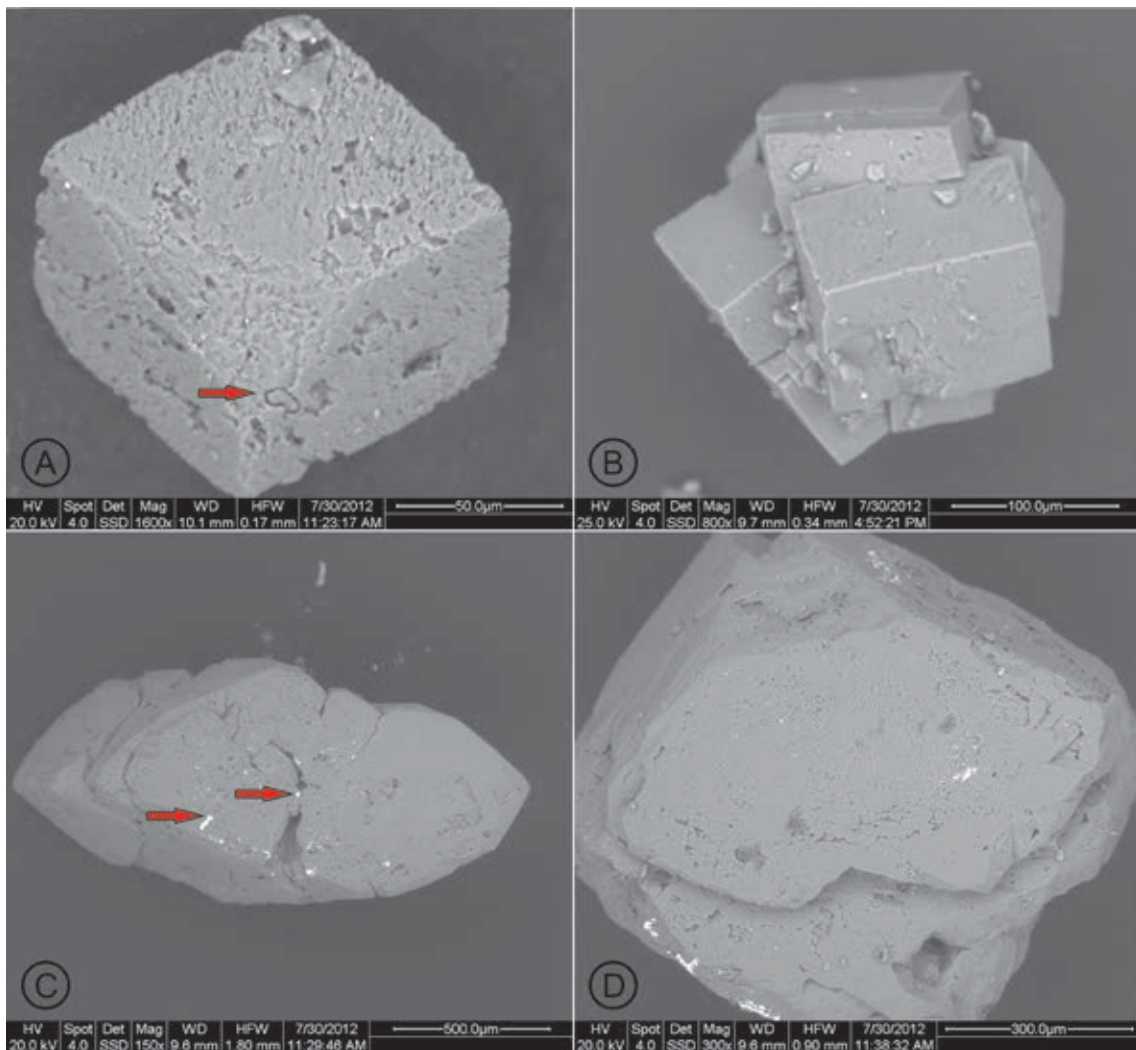


Abb. 65: A) Idiomorpher, oberflächlich durch weggelösten Halit und Anhydrit poröser Dolomitkristall mit eingewachsenem Quarzkristall (Pfeil) aus der Bohrung RB648 (Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 B) Aggregat aus idiomorphen Dolomitkristallen (RB659; Teufe 1,82 m bis 1,84 m).
 C) Aggregat aus hypidiomorphen Dolomitkristallen, teilweise lose verwachsen und mit eingeschlossenen, weiß erscheinenden, idiomorphen Pyritwürfeln bzw. -aggregaten (Pfeile) aus der Bohrung RB648 (Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 D) Idiomorpher Dolomitkristall mit einspießendem Hohlraum im unteren Bildausschnitt in Folge eines weggelösten Anhydritkristalls (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).

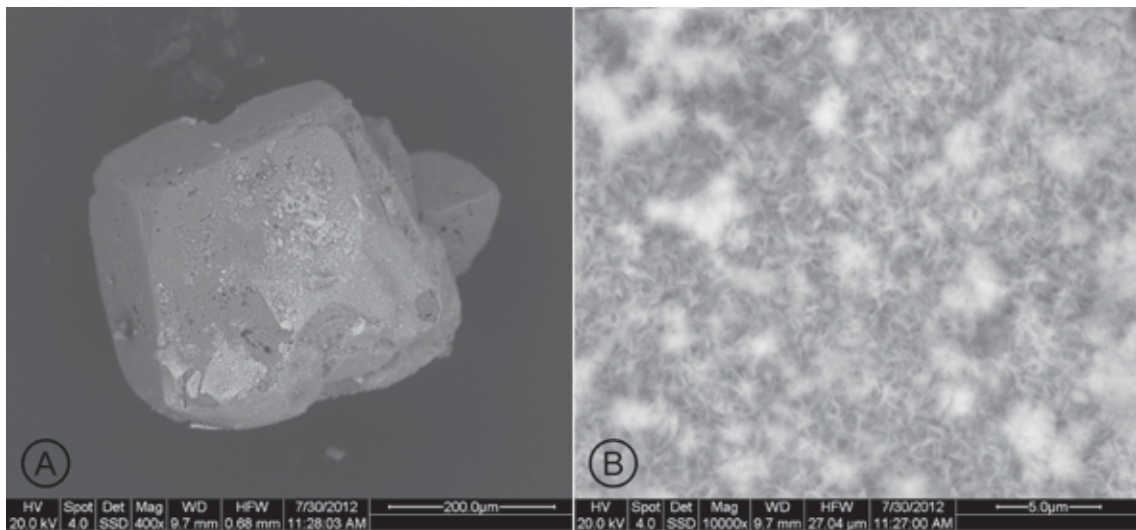


Abb. 66: A) Idiomorpher Dolomitkristall mit einem mürben, orangefarbenen bis rötlichbraunen Überzug aus nicht näher zu bestimmenden Eisenoxiden/-hydroxiden (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 B) Starke Vergrößerung des orangefarbenen bis rötlichbraunen Überzugs. Die einzelnen Eisenoxid/-hydroxidkristalle erscheinen blättrig/stängelrig bzw. zu Aggregaten verklumpt (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).

Neben den Dolomitkristallen konnten in den exemplarisch untersuchten Proben auch zahlreiche hypidio- bis idiomorphe Pyritkristalle, darunter perfekt ausgebildete Pentagondodekaeder (Abb. 67 A), Würfel- bis Kuboktaeder (Abb. 67 B) sowie bis mehrere hundert Mikrometer große Pyritaggregate (Abb. 67 C & D) beobachtet werden. Viele der Pyritkristalle weisen hoch glänzende, stark reflektierende Kristallflächen auf; teilweise ist an den Würfeln und Kuboktaedern die typische Flächenstreifung durch alternierendes Flächenwachstum zu erkennen (Abb. 67 B bzw. 69 A). Wie bereits bei den Dolomiten weisen auch einzelne Pyritkristalle eine durch aufgelösten Halit und Anhydrit zurückbleibende, leicht poröse Oberfläche auf.

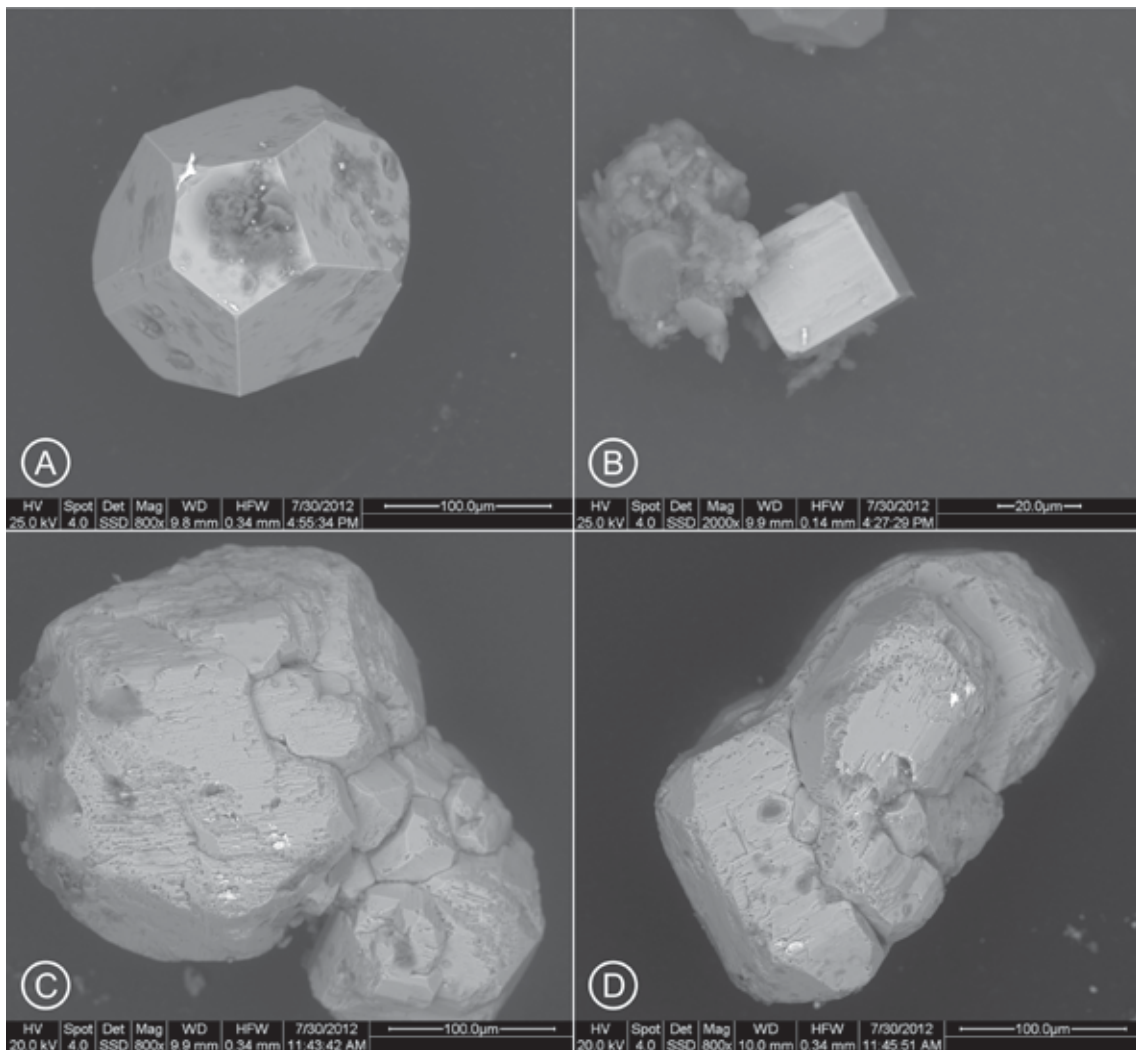


Abb. 67: A) Idiomorpher Pyritkristall (Pentagondodekaeder) mit glatten Kristallflächen und scharfen Kanten (RB659; Teufe 1,82 m bis 1,84 m).
 B) Idiomorpher Pyritkristall (Würfel bis beginnender Kuboktaeder) mit erkennbarer Flächenstreifung neben einem Tonaggregat (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 C) Hypidiomorphes Pyritaggregat aus zahlreichen kleinen und großen Pyritkristallen mit teilweise poröser Oberfläche auf Grund weggelöster Halit- und Anhydritkristalle (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 D) Hypidiomorphes Pyritaggregat mit teilweise poröser Oberfläche auf Grund weggelöster Halit- und Anhydritkristalle. Auffällig sind ringartige Strukturen im linken, unteren Pyritkristall, bei denen es sich um Kohlenstoffverbindungen (vermutlich anhaftende KW) handelt (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).

Neben Dolomit und Pyrit sowie Tonmineralen und Resten von ungelöstem Anhydrit, welche die Hauptmasse des unlöslichen Rückstandes bilden, konnten im ESEM anhand gepickter Kristalle bzw. Stempelproben (Eintauchen der Leit-Tabs in den unlöslichen Rückstand) vereinzelt auch andere akzessorisch auftretende Minerale beobachtet werden. Als häufigstes Mineral konnten wasserklare, idiomorphe, vermutlich authigen gebildete Quarzkristalle (Alpha- und Beta-Quarz) bis ca. 200 µm Größe beobachtet werden, welche immer als Doppelender (Abb. 68 A) ausgebildet sind. Gelegentlich treten auch zu Gwindeln

verwachsene Quarzkristalle (Abb. 68 B) auf. Obwohl in Bezug auf die Gesamtmasse vergleichsweise unbedeutend, stellen die Quarzkristalle die Mehrzahl der idiomorphen Kristalle im unlöslichen Rückstand dar.

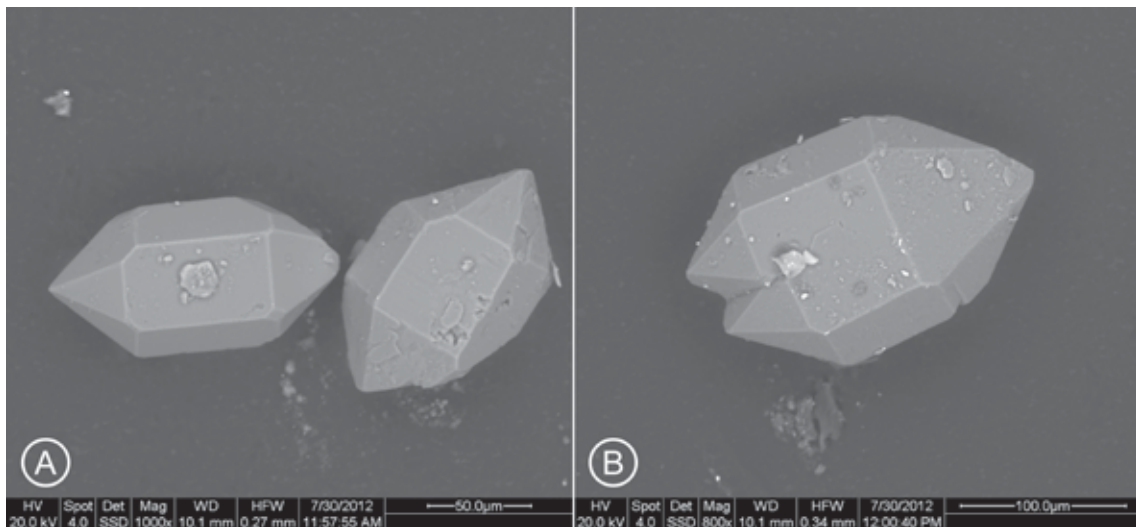


Abb. 68: A) Idiomorphe wasserklare Quarzdoppelender mit perfekten Kristallflächen (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 B) Kleines Quarz-Gwindel aus wasserklaren Quarzkristallen (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).

Als akzessorische Minerale konnten, teilweise nur als Einzelkorn im unlöslichen Rückstand, weiterhin mittels EDX nachgewiesen werden: Kali-Feldspat (Abb. 69 A & B), Cölestin (Abb. 69 C), Fluorit (Abb. 69 D), Galenit (Abb. 69 E) und La-Karbonat (Abb. 69 F).

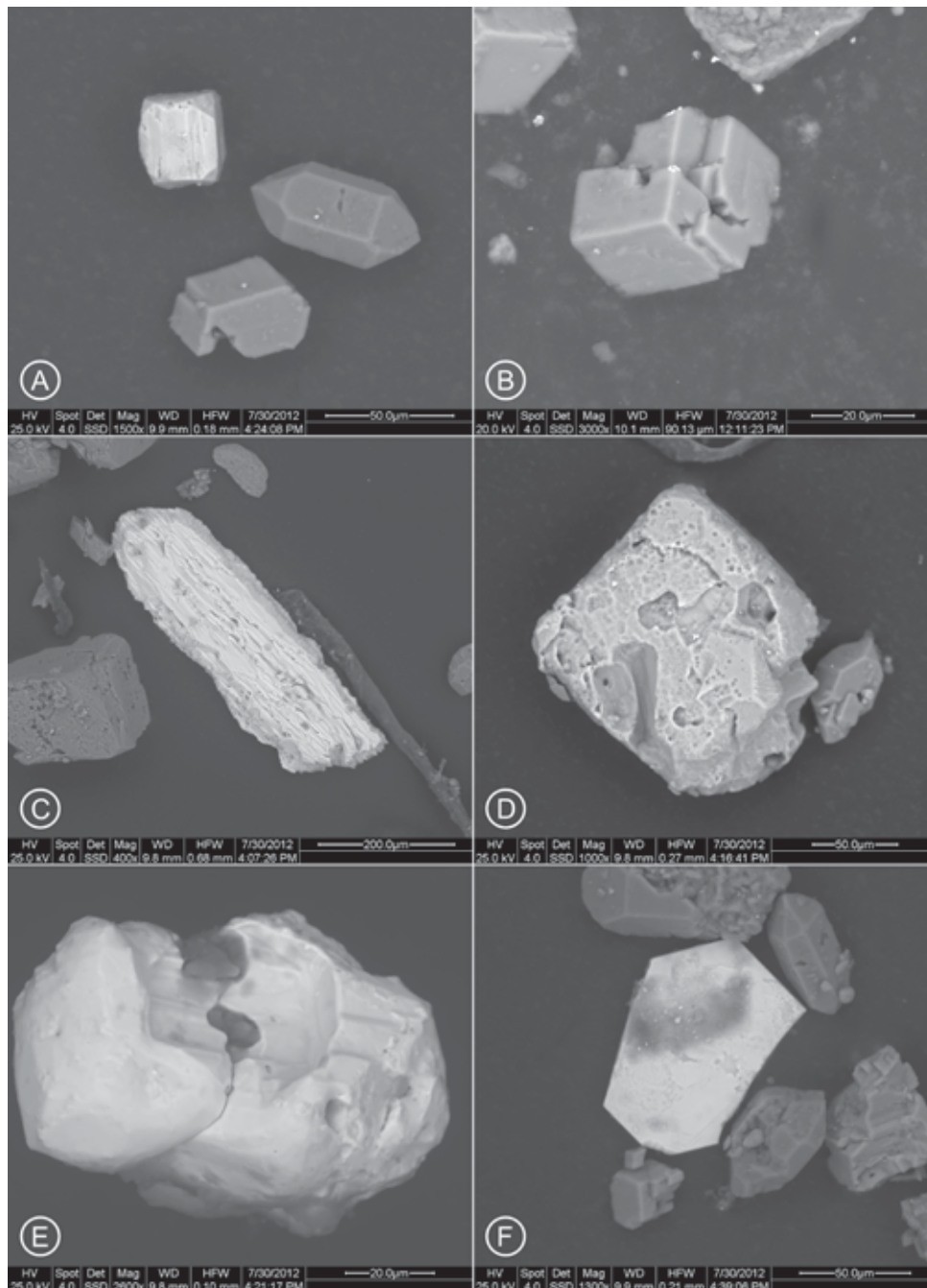


Abb. 69: A) Idiomorphe intakte Kristalle von Pyrit (Kuboktaeder mit Flächenstreifung, oben), Quarz (Doppeler, mittig rechts) und ein zerbrochener Kali-Feldspat (unten) aus der Bohrung RB648 (Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 B) Idiomorphe Kali-Feldspäte mit intakten Kristallflächen (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 C) Stängeliger, randlich ausgefranster Coelestinkristall mit zahlreichen Bruchflächen neben einem oberflächlich porösen Dolomitekristall (links; RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 D) Idiomorpher Fluoritkristall mit löchrig-poröser Oberfläche neben einem kleinen verzerrten Quarzkristall (rechts; RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 E) Xenomorphes Aggregat aus zwei miteinander verwachsenen Galenitkristallen (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).
 F) Hypidio- bis idiomorphes, mittels EDX nicht weiter spezifizierbares Lanthan-Karbonat neben idiomorphen, teilweise beschädigten Quarzdoppeler, sowie Kali-Feldspäten (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).

8.2 Schlussfolgerungen aus den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen

Die Untersuchung der unlöslichen Rückstände aus Lösungsversuchen von KW-führenden Hauptsalzproben aus dem Q1W im atmosphärischen Rasterelektronenmikroskop (ESEM) zeigte neben dem Vorkommen von nicht näher spezifizierten Tonmineralen zahlreiche hypidio- bis idiomorphe akzessorische Minerale, deren Vorkommen in Salzgesteinen eher ungewöhnlich ist. Auffällig sind die überwiegend perfekt ausgebildeten, idiomorphen Kristalle, an welchen nur vereinzelt Transportschäden (siehe Fluorit Abb. 69 D) zu erkennen sind.

Das Vorkommen von Dolomit, Pyrit, Coelestin und Quarz sowie von deren gegenseitigen Verwachsungen kann mit einer Entstehung im marinen Milieu während der Salzablagerung (Ausfällung Karbonat durch Frischwassereintrag) bzw. der Diagenese (Umwandlung von Karbonat (Calcit) in Dolomit, Bildung von Pyrit unter Beteiligung organischer Komponenten, Ausfällung von gelöster Kieselsäure als authigener Quarz) erklärt werden. Das Vorhandensein von Kali-Feldspat und Fluorit scheint auf äolische (z. B. Feldspat) bzw. fluviatile Transportwege hinzudeuten. Die mit Eisenoxid/-hydroxiden überkrusteten Dolomitkristalle deuten auf ein überwiegend oxidierendes und damit festländisches Bildungsmilieu der Eisenkrusten hin.

Auch die teilweise perfekt ausgebildeten Dolomit- und Pyritkristalle, welche kaum Verwachsungen mit Halit bzw. Anhydrit zeigen, sowie die Quarzkristalle könnten möglicherweise äolisch vom Festland eingetragen worden sein. Um die Herkunft bzw. Entstehung dieser Komponenten und den möglichen Zusammenhang zwischen ihrem Vorkommen und der KW-Führung der Salzgesteine zu klären, werden gegenwärtig Proben von Dolomit und Pyrit isotopengeochemisch analysiert. Aussagen über Transportwege und Liefer-/ Bildungsgebiete einiger akzessorischer Minerale sind nur nach weiterführenden Untersuchungen möglich und abhängig von der Menge des aus den unlöslichen Rückständen gewinnbaren Probenmaterials.

9 Packerbohrungen zur In-situ-Quantifizierung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen

9.1 Zielsetzung der Druckaufbaumessungen in den Packerbohrungen

Ergänzend zu den geologischen KW-Erkundungs- und Probenahme-Kurzbohrungen sind 20 KW-Packerbohrungen mit einer Länge von je 6 m (Durchmesser 46 mm) zur In-situ-Quantifizierung der KW-Vorkommen im EB1 in den Jahren 2011 und 2012 gestoßen worden.

Ziele der KW-Packerbohrungen waren u. a.:

- die Analyse der Isoliertheit bzw. Interkonnektivität der erbohrten KW-Vorkommen,
- die Untersuchung von möglichen kleinräumigen KW-Migrationswegen im Hauptsalz (z2HS1, z2HS2 und z2HS3),
- die Bereitstellung einer Datenbasis für die Größenabschätzung der aufgeschlossenen KW-Vorkommen sowie
- die Ermittlung der KW-Zutrittsraten.

Aufgrund dieser Zielstellungen wurden folgende Aspekte bei der Planung und Ausführung der Bohrungen bzw. Messungen berücksichtigt (ZARETZKI et al. 2012):

- Langzeitüberwachung der Druckentwicklung und des in die KW-Packerbohrungen zutretenden Gesamtvolumens,
- kontinuierliche Messungen mit hochauflösenden Messapparaturen,
- Installation der Messintervalle in den Bohrungen außerhalb der Auflockerungszone der Streckenauffahrungen und
- getrennte Probenahme von gasförmigen und flüssigen KW für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung.

Informationen zur technischen Ausführung der Packerbohrungen, zur räumlichen Lage der abgepackerten Bereiche in den Bohrungen, zum Aufbau und zur Wirkungsweise der in den Packerbohrungen installierten Mess- und Probenahmetechnik sowie zur Lage der im Q1W angeordneten Packerbohrungen sind in HAMMER et al. (2012) und PAUL et al. (2012, 2013) enthalten.

9.2 Installation der Packerbohrungen im Jahr 2012 und erste Befunde

Bis Ende 2012 wurden alle 20, im Rahmen des Arbeitspaketes 9GE 332300000 geplanten KW-Packerbohrungen im EB1 erstellt. Im Anschluss an die 2011 durchgeführten Arbeiten im Q1W wurden im Jahr 2012 die im Q1E und in den Bohrorten 1.2, 3.1 und 5.0 gelegenen Packerbohrungen RB693 bis RB702 gekernt und instrumentiert (Abb. 70).

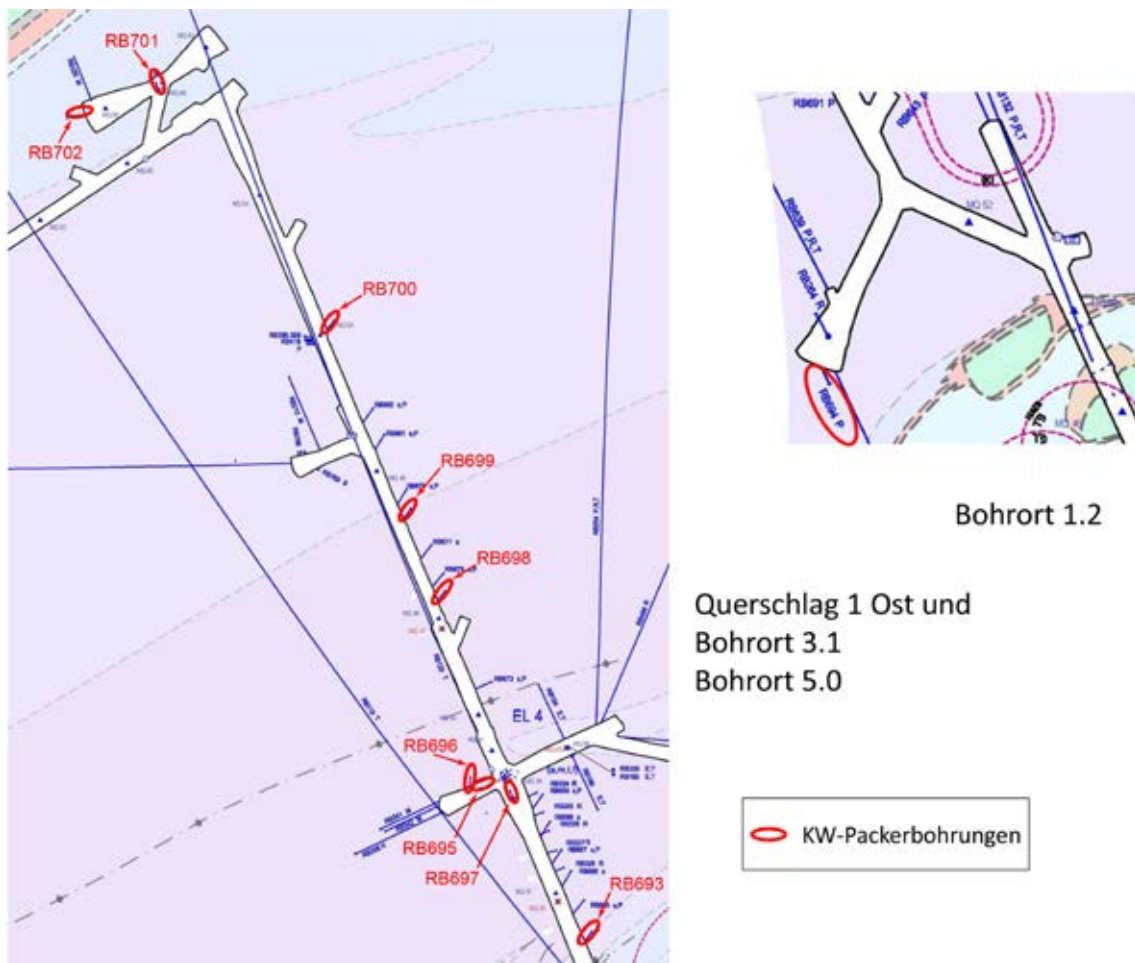


Abb. 70: Übersicht zu den KW-Packerbohrungen im Q1E, Bohrort 1.2, Bohrort 3.1 und im Bohrort 5.0.

Die Lokationen und die stratigraphische Zuordnung der abgepackerten Bohrungsbereiche aller 20 KW-Packerbohrungen sind in Tab. 8 aufgeführt. In den Anhang 21 bis 30 befinden sich die Darstellungen zur stratigraphischen Einordnung und die Befunde zur Fluoreszenz bzw. KW-Führung der Kerne der in 2012 im Q1E und in den Bohrorten 1.2, 3.1 und 5.0 gestoßenen Packerbohrungen. Durch die Bohrungen werden mit dem Knäuelsalz (z2HS1), dem Streifensalz (z2HS2) und dem Kristallbrockensalz (z2HS3) alle stratigraphischen Einheiten des Hauptsalzes (z2HS) der Staßfurt-Folge erfasst.

Tab. 8: Lage und Stratigraphie aller in den Jahren 2011 und 2012 installierten KW-Packerbohrungen im EB1.

Bohrung	Stratigraphie	Lokation
RB683	z2HS1	Querschlag 1 West
RB684	z2HS1	Querschlag 1 West
RB685	z2HS1	Querschlag 1 West
RB686	z2HS1	Querschlag 1 West
RB687	z2HS1	Querschlag 1 West
RB688	z2HS1	Querschlag 1 West
RB689	z2HS1	Querschlag 1 West
RB690	z2HS1	Querschlag 1 West
RB691	z2HS1	Querschlag 1 West
RB692	z2HS1	Querschlag 1 West
RB693	z2HS2/z2HS3	Querschlag 1 Ost
RB694	z2HS2	Bohrrort 1.2
RB695	z2HS1	Bohrrort 3.1
RB696	z2HS1	Bohrrort 3.1
RB697	z2HS1	Querschlag 1 Ost
RB698	z2HS1	Querschlag 1 Ost
RB699	z2HS2	Querschlag 1 Ost
RB700	z2HS2	Querschlag 1 Ost
RB701	z2HS3 (Anhydrit-Band)	Bohrrort 5
RB702	z2HS3 (Anhydrit-Band)	Bohrrort 5

9.2.1 Bohrrort 1.2 (RB694)

Die Bohrung RB694 wurde von der Ortsbrust des Bohrrortes 1.2 aus in Richtung Süden gestoßen (Abb. 71). Sie verläuft mit einer Orientierung von 170 gon parallel zur geologischen Erkundungsbohrung 02YEQ02 RB815, ist allerdings – im Gegensatz zur RB815 mit 2 gon ansteigend gebohrt. Die Instrumentierung und Messwerterfassung erfolgten umgehend nach Fertigstellung der Bohrung. Der zunächst starke Druckaufbau nahm nach fünf Druckentlastungen innerhalb weniger Tage deutlich ab. Es ist jedoch weiterhin ein geringfügiger Druckanstieg zu beobachten (PAUL et al. 2013).



Abb. 71: Lokation der Bohrung RB694 im Bohrort 1.2.

9.2.2 Querschlag 1 Ost (RB693 und RB695 bis RB700)

Im Berichtszeitraum wurden sieben KW-Packerbohrungen (RB693 und RB695 bis RB700) im Q1E erstellt. Die Auswahl der Lokationen der Bohrungen RB695 bis RB697 erfolgte anhand der UV-Kartierungsergebnisse von AMELUNG & SCHUBERT (2000). Für die Lokationsfestlegungen wurden auch Bereiche mit erhöhten Konvergenzen sowie Beobachtungen aus Ankerbohrungen einbezogen. Für die Detailplanung zur Bohrungsorientierung der Bohrungen RB695 und RB696 wurden Stoß und Firste im Bohrort 3.1 mit UV-Strahlung untersucht. Die Bohrung RB695 im Bohrort 3.1 verläuft mit einer Orientierung von ca. 72 gon annähernd parallel zur Achse des Bohrortes und weist einen Anstieg von 51 gon auf. Die Bohrung RB696 wurde in den nördlichen Stoß des Bohrortes 3.1 mit einer Orientierung von 10 gon und einem Anstieg von 13 gon in Richtung Norden gestoßen. Die Bohrung RB697 wurde im Q1E südlich des Streckenkreuzes zum Bohrort 3.1 und zur Richtstrecke 2 Ost in die Firste gestoßen. Die Orientierung ist mit 374 gon parallel zum Verlauf des Q1E, der Anstieg beträgt 50 gon in Richtung Norden.

Die Bohrungen RB695 und RB697 zeigen seit ihrer Instrumentierung keinen signifikanten Druckanstieg. Daher wurde in diesen beiden Bohrungen bislang weder eine Druckentlastung noch eine Probenahme durchgeführt. Die Bohrung RB696 ist die einzige Bohrung im Q1E, in der ein Druckanstieg zu beobachten ist. Seit ihrer Instrumentierung bzw. dem

Beginn der Messwerterfassung zeigt die RB696 einen signifikanten, treppenstufenartigen Druckanstieg bis ca. 2,4 bar. Auf diesem Niveau hält sich der Druck seit Ende Juni 2012.

Die Lokationen der Bohrungen RB693 und RB698 bis RB700 wurden auf der Grundlage der geologischen Aufnahme der Kerne aus den KW-Kurzbohrungen (RB663 bis RB682) festgelegt (siehe Anhang 1 bis 20). Mit Kunstlicht oder UV-Strahlung waren keine weiteren KW-führenden Bereiche im Q1E sichtbar, die Zusatzinformationen für die Positionierung der Bohrungen hätten liefern können. Die Bohrung RB698 wurde zwischen den KW-Probenahme-Kurzbohrungen RB675 und RB676 gestoßen, in denen KW-führende Bereiche festgestellt wurden. Die am 22.11.2011 und 23.11.2011 erstellten und abgepackten Probenahmebohrungen zeigten am 12.01.2012 einen anstehenden Druck von 0,5 bar.

Die KW-Packerbohrung RB699 wurde im Bereich der KW-Probenahme-Kurzbohrungen RB677 und RB679 lokalisiert, in denen ebenfalls KW-führende Bereiche innerhalb der ersten sechs Bohrmeter nachgewiesen wurden. Die Bohrungen RB698 und RB699 wurden mit einer Orientierung von 40 gon und einem Anstieg von 2 gon in Richtung NE in den östlichen Stoß des Q1E gestoßen. Beide Bohrungen zeigen keinen signifikanten Druckanstieg (PAUL et al. 2013). Die Bohrungen RB693 und RB700 sind als Referenzbohrungen in Bereichen ohne unter UV-Strahlung sichtbare KW-Führung lokalisiert worden. Die RB693 liegt im Bereich der Grenze zwischen dem Streifensalz (z2HS2) und dem Kristallbrockensalz (z2HS3) im südlichen Abschnitt des Q1E. Die Bohrungen RB693 und RB700 sind mit einer räumlichen Orientierung von 40 gon und einem Anstieg von 2 gon vom östlichen Stoß in Richtung NE gestoßen worden. Alle vier Bohrungen zeigen seit der Instrumentierung keinen signifikanten Druckanstieg, weshalb keine Druckentlastung und Probenahme durchgeführt wurde.

9.2.3 Bohrort 5.0 (RB701 und RB702)

Die Lokation der Bohrung RB702 im Bohrort 5.0 wurde auf der Grundlage eines bei der Bohrort-Auffahrung aufgeschlossenen Anhydrit-Bandes im Kristallbrockensalz ausgewählt, in dessen näherer Umgebung kleinere KW-führende Bereiche zu beobachten waren (siehe Abb. 56). Das partiell vollständig unterbrochene bzw. abgerissene Anhydrit-Band zieht sich mit einer infolge von Boudinage stark wechselnden Mächtigkeit von maximal 20 cm von NE nach SW durch das gesamte Bohrort, beginnend an der nordöstlichen Ortsbrust über die Firste bis zur südwestlichen Ortsbrust.

Die Bohrung RB702 wurde vom westlichen Stoß aus bis in den Bereich des Anhydrit-Bandes gestoßen, um mögliche Gas- und Kondensatzutritte zu detektieren. Die Bohrung steigt mit 2 gon an und hat eine Orientierung von 288 gon. Das Bohrungsziel – das

Anhydrit-Band – wurde in ca. 5,50 m Bohrteufe angetroffen. Damit war die Vorgabe, das Band mit der Bohrung im Bereich zwischen drei und sechs Metern Tiefe zu kreuzen, erfüllt. Im Schnittpunkt mit der KW-Packerbohrung weist das boudinierte Anhydrit-Band eine Mächtigkeit von ca. 10 cm auf. Eine KW-Führung konnte in diesem Bereich weder makroskopisch im Kunstlicht noch durch die Bestrahlung mit UV-Strahlung festgestellt werden. Seit Beginn der Messwerterfassung ist in der Bohrung RB702 kein Druckanstieg zu beobachten.

Im Bohrort 5.0 wurde Ende Oktober 2012 mit der Bohrung RB701 eine weitere Bohrung zur Erfassung des Anhydrit-Bandes gestoßen. Die Bohrung liegt zentral im Kreuzungsbereich der SW- und NE-Flügel des Bohrortes (Abb. 70) und ist mit einer Orientierung von 3 gon und einem Anstieg von 44 gon in Richtung Norden gestoßen worden. Bis Ende Dezember stieg der Druck allmählich bis auf 4,2 bar.

9.3 Klassifizierung der Packerbohrungen anhand der Druckaufbaumessungen

Die Festlegung der Lokationen für die KW-Packerbohrungen erfolgte nach den geologischen Befunden in den Strecken, Bohrorten und in den Probenahme-Kurzbohrungen sowie den Ergebnissen der UV-Kartierung (HAMMER et al. 2012). Mit den 20 KW-Packerbohrungen wird ein breites Spektrum an KW-impregnierten Bereichen, das KW-Vorkommen in allen drei Hauptsalz-Typen beinhaltet, erfasst. Von starken, unter natürlichem Licht sichtbaren Imprägnationen bis hin zu schwachen, nur unter UV-Strahlung sichtbaren Bereichen sind alle Übergänge vorhanden. Zusätzlich wurden Referenzbohrungen in Hauptsalz-Bereichen ohne unter UV-Strahlung sichtbare KW-Imprägnationen instrumentiert.

Anhand der Druckaufbaumessungen und den daraus errechneten Zutrittsmengen können die KW-Packerbohrungen in vier Kategorien eingeteilt werden:

- Kategorie 1: sehr geringer Druckaufbau (< 0,3 bar)
- Kategorie 2: geringer Druckaufbau (< 10 bar, keine Druckentlastung erforderlich)
- Kategorie 3: intensiver Druckaufbau (anfänglich häufige Druckentlastung erforderlich)
- Kategorie 4: sehr intensiver Druckaufbau (in kurzen Zeitabständen bis heute regelmäßig Druckentlastung erforderlich)

Von den 20 KW-Packerbohrungen sind 10 Bohrungen der Kategorie 1 zuzuordnen. Der maximal gemessene Druckanstieg in diesen Bohrungen liegt bei 0,2 bar bis 0,3 bar. Von diesen 10 Bohrungen wurden nur 2 Bohrungen (RB693 und RB700) als Referenzbohrungen

in Bereiche ohne sichtbare KW-Führung gestoßen. Die restlichen 8 Bohrungen weisen trotz der auf KW-Führung des unmittelbar benachbarten Hauptsalzes hindeutenden Vorbefunde, keine signifikanten Druckanstiege auf. Die KW-imprägnierten Bereiche in diesen Bohrungen sind aufgrund dieser Befunde entweder als Bereiche mit schwacher KW-Führung ausgebildet oder als stark UV-aktive Bereiche, dafür aber mit sehr begrenztem Volumen. Zur Kategorie 1 zählen die Bohrungen RB684, RB691, RB692 im Q1W und die Bohrungen RB693, RB695, RB697, RB698, RB699, RB700 Q1E sowie die Bohrung RB702 im Bohrort 5.0.

Die Bohrungen RB690 im Q1W und RB696 im Bohrort 3.1 zeigen einen geringen Druckaufbau von weniger als 10 bar und sind somit der Kategorie 2 zuzuordnen. Obwohl in den Bohrkernabschnitten zwischen drei und sechs Metern mehrere Bereiche mit starker oder schwacher Fluoreszenz dokumentiert wurden, steigt der Druck nicht über die Grenze von 10 bar, bei deren Erreichen eine Druckentlastung aus Sicherheitsgründen aufgrund von bergamtlichen Vorgaben erforderlich ist. Auch die Bohrung RB701 kann aufgrund des geringen Druckaufbaus der Kategorie 2 zugeordnet werden.

Die Bohrungen RB683 (in der sogenannten UV-Nische), RB694 (Bohrort 1.2) sowie RB686 und RB687 (Q1W; Zutrittsstelle RF81, siehe BfS 2002) gehören zur Kategorie 3. Die Druckkurven der vier Bohrungen sind durch einen steilen, stufenartigen Anstieg charakterisiert. Der Druckaufbau in den Bohrungen RB683 und RB687 hat sich nach einem anfänglich starken Anstieg (einige Tage bis wenige Wochen bis zur erforderlichen Druckentlastung) abgeschwächt (Abb. 72). Für einzelne Bohrungen werden in nachfolgenden Druckaufbauphasen höhere Gasdrücke als in den Anfangsphasen erreicht.

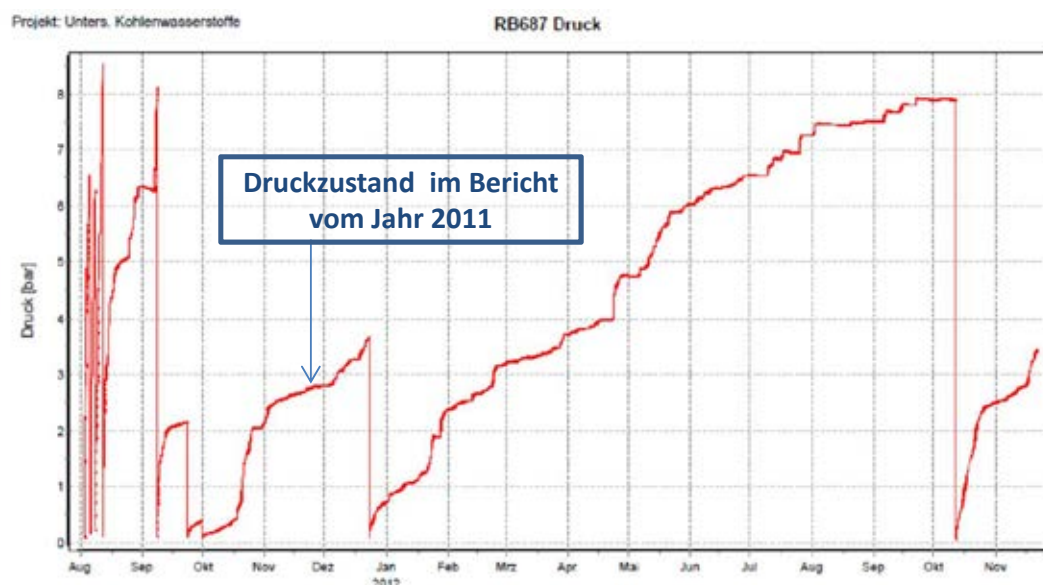


Abb. 72: Gemessener Druckaufbau in der Bohrung RB687.

Nur drei der 20 installierten Bohrungen sind der 4. Kategorie zuzuordnen. Diese drei Bohrungen – RB685, RB688 und RB689 – liegen im Q1W. Die zeitliche Entwicklung der berechneten Massenflussrate und des gemessenen Intervalldruckes ist exemplarisch für die Bohrung RB688 in Abb. 73 dargestellt. Die Intensität des Druckanstieges ist auch nach mehr als einem Jahr unverändert hoch. Auffällig ist die zeitweise verringerte Zutrittsrate zwischen Anfang Oktober und Anfang November 2011 (74 Tage bis 89 Tage nach Installation, Abb. 73) in allen drei Bohrungen.

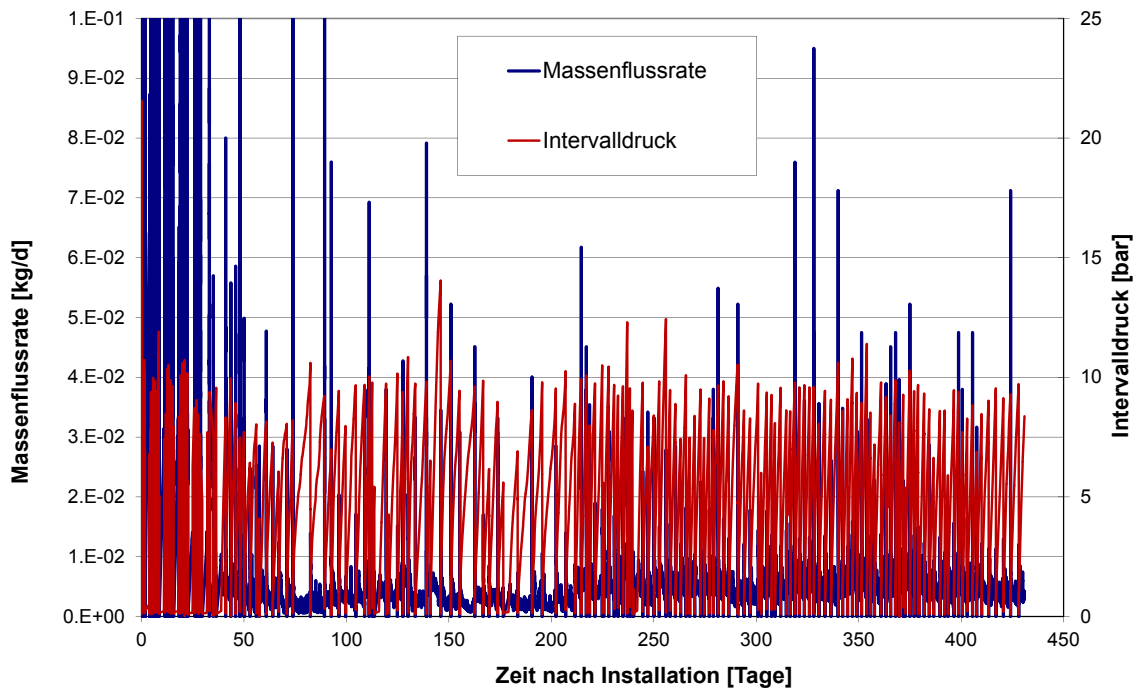


Abb. 73: Zeitliche Veränderung der berechneten Massenflussrate und des gemessenen Intervalldruckes in der Bohrung RB688.

9.4 Bestimmung des Gasvolumens und des Einflussbereiches der Druckentlastung im Gebirge

9.4.1 Auswerteverfahren zur Gasvolumenbestimmung

Zur Abschätzung der Gasvolumina anhand der in den Messintervallen gemessenen Drücke wurde die Massenbilanztheorie angewandt. Die Ableitung der Massenbilanztheorie zur Massenflussrate- und Gasvolumenberechnung wurde ausführlich in ZARETZKI et al. (2012) und HAMMER et al. (2012) beschrieben. Die Parametersätze, insbesondere die Syntheseparameter wie Gaskonstante, Dichte und Viskosität der Gasmischung, sowie das gesamte Intervallvolumen der jeweiligen Bohrung sind gegenüber 2011 unverändert. Die berechneten Gasvolumina stimmen weiterhin gut mit den gemessenen Daten überein.

In Abb. 74 bis 76 sind beispielhaft die kumulativen Gas- und Kondensatvolumina von den Bohrungen der Kategorie 4 (RB685, RB688 und RB689) bis zum Berichtsstichtag dargestellt. Die Einheit (stdl) in den Abbildungen entspricht Liter unter Normalbedingungen. Unter Normalbedingung ist dabei ein Druck von 1013 hPa und eine Temperatur von 298 K zu verstehen. Auffällig ist das quasi-lineare Ansteigen aller kumulativen Kurven seit über einem Jahr. Der Zutritt ist in diesen drei Packerbohrungen so stark, dass von der DBE Sonderschichten während der Feiertage eingerichtet werden mussten, um die vom Bergamt geforderten Druckentlastungen und die Probenahmen in diesen Bohrungen vornehmen zu können.

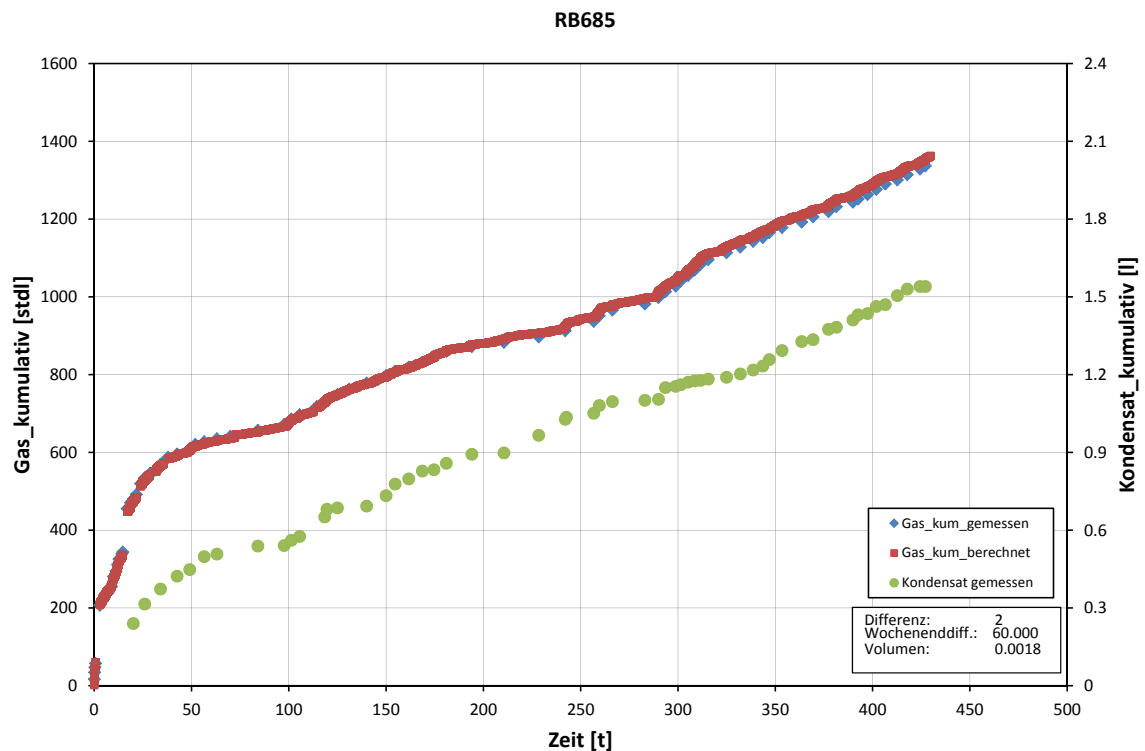


Abb. 74: Kumulatives Gas- und Kondensatvolumen aus der Bohrung RB685 unter Normalbedingungen.

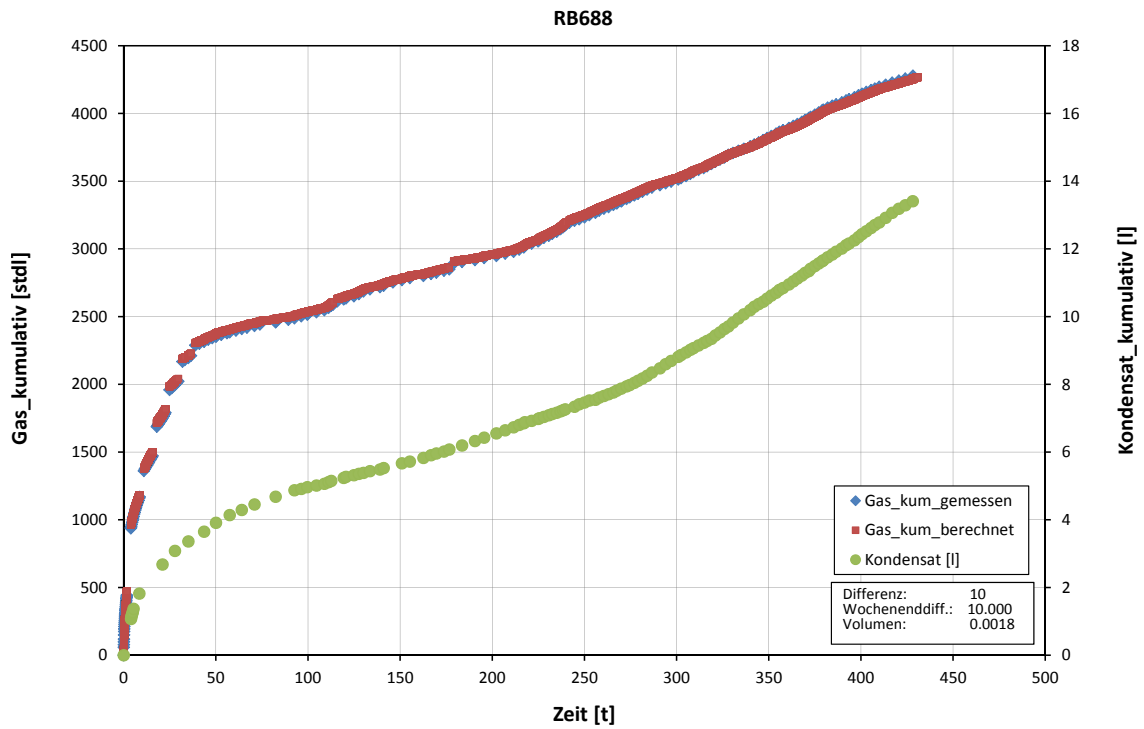


Abb. 75: Kumulatives Gas- und Kondensatvolumen aus der Bohrung RB688 unter Normalbedingungen.

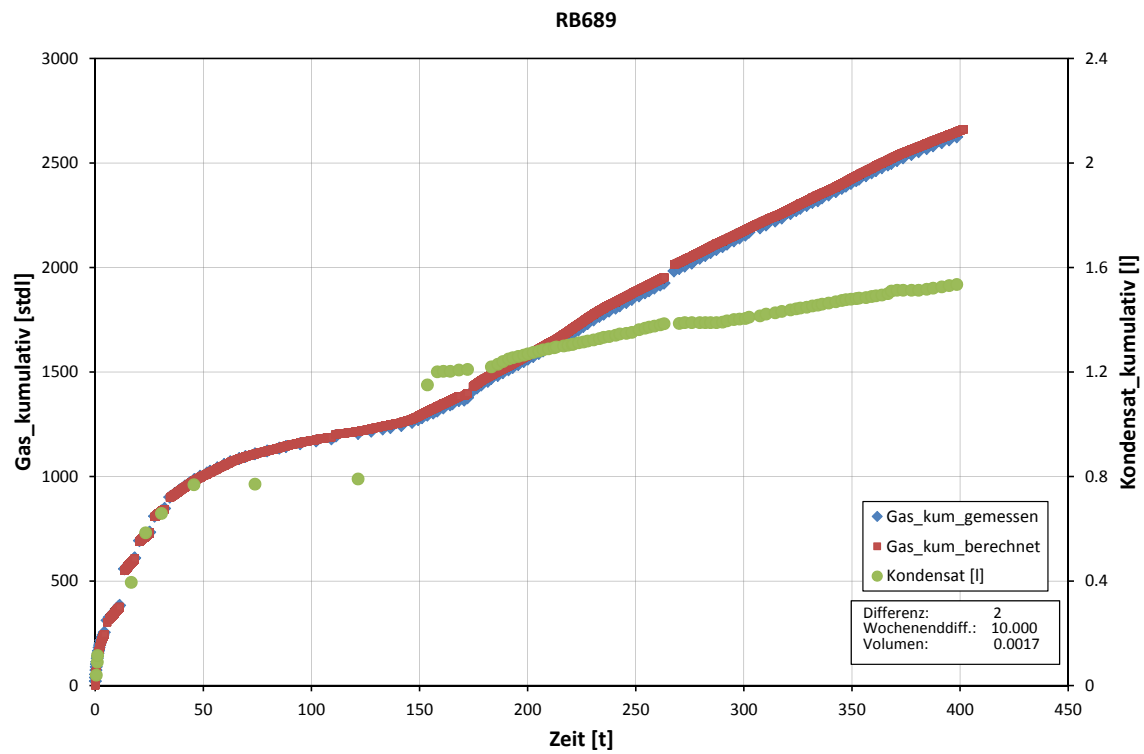


Abb. 76: Kumulatives Gas- und Kondensatvolumen aus der Bohrung RB689 unter Normalbedingungen.

9.4.2 Abschätzung des durch die Packerbohrungen hervorgerufenen Einflussbereiches der Druckentlastung

Auf der Basis der gemessenen bzw. berechneten Mengen der flüssigen und gasförmigen KW wird ein Schätzverfahren zur Quantifizierung des Gebirgsvolumens, in dem die KW unter ungestörten Bedingungen vorliegen und bei Anbohren bzw. Druckentlastung in die Packerbohrungen migrieren, angewandt. In diesem Verfahren werden die Lösungs- und Freisetzungsprozesse der Gase in und aus dem flüssigen Kondensat sowie die Umwandlung der verschiedenen KW nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieser Prozesse erfolgt im Rahmen der Größenbestimmung der KW-Vorkommen im Abschlussbericht des Arbeitspaketes.

Die Porosität von intensiv fluoreszierenden KW-führenden Bohrkernbereichen aus den Bohrungen RB685, RB686 und RB687 wurde mittels computertomographischen Laboruntersuchungen mit Werten zwischen 0,6 und 1,26 % bestimmt (siehe Kap. 4.3.3). Folglich wird für die Abschätzung des von den KW eingenommenen Bereiches (Radius und Gebirgsvolumen) näherungsweise eine Porosität von 1 % angenommen. Wenn alle mit UV-Strahlung detektierten KW-imprägnierten Bereiche zwischen 3 und 6 Metern (Intervalllänge des abgepackerten Bereiches) in der Bohrung RB688 (HAMMER et al. 2012) - unabhängig von der Intensität – summiert werden, ergibt sich eine Gesamtlänge der KW-imprägnierten Bereiche von 1,27 m (Abb. 77). Am Beispiel der Daten bis zum 07.06.2012 wurden entsprechende Berechnungen durchgeführt. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde ein Kondensatvolumen von rund 9 Liter und ein Gasvolumen von rund 3500 Liter unter Normalbedingungen gemessen. Mit der Annahme eines Anfangsdruckes von 180 bar für das im Gebirge enthaltene Gas bei ungestörten Anfangsbedingungen (konservative Annahme) ergibt sich ein komprimiertes Gasvolumen von 19,5 Liter. Um die gesamte Menge an Gas und Kondensat (19,5 Liter Gas + 9 Liter Kondensat = 28,5 Liter Gesamt) bei einer Porosität von 1 % im Porenraum des Gebirges zu verteilen, wird ein Gebirgsvolumen von 2,85 m³ benötigt. Dabei bleibt eine Lösung von Gas im Kondensat unberücksichtigt. Mit dieser Annahme kann der Radius des imprägnierten Bereiches um die Bohrung mit Formel (3) berechnet werden:

$$R = \sqrt{\frac{V}{\pi L} + r^2} \quad (3)$$

mit V = Gebirgsvolumen [m³]
 L = Kernlänge des KW-imprägnierten Bereiches [m]
 r = Bohrungsradius [m]

Tab. 9 zeigt eine Zusammenfassung der für die Bestimmung des Einflussbereiches benötigten Daten. Die Gesamtkernlänge der KW-imprägnierten Bereiche innerhalb einer Bohrung ergibt sich aus den summierten Teilbereichen nach HAMMER et al. (2012). Für die Bestimmung des Einflussbereiches in Abhängigkeit von der Zeit wurde die bis zum jeweiligen Zeitpunkt zugetretene Gas- und Kondensatmenge verwendet.

Tab. 9: Notwendige Daten für die Volumen- und Radiusberechnung.

Bohrung	Länge des KW-imprägnierten Bereiches [m] nach UV-Strahlung-Befunden	Summe des Kondensatvolumens in Liter bis 30.09.2012	Summe des Gasvolumens in Standardliter bis 30.09.2012
RB685	1,85	1,54	1.340
RB686	1,8	1,248	241
RB687	1,35	0,053	153
RB688	1,27	13,28	4.234
RB689	1,31	1,564	2.726

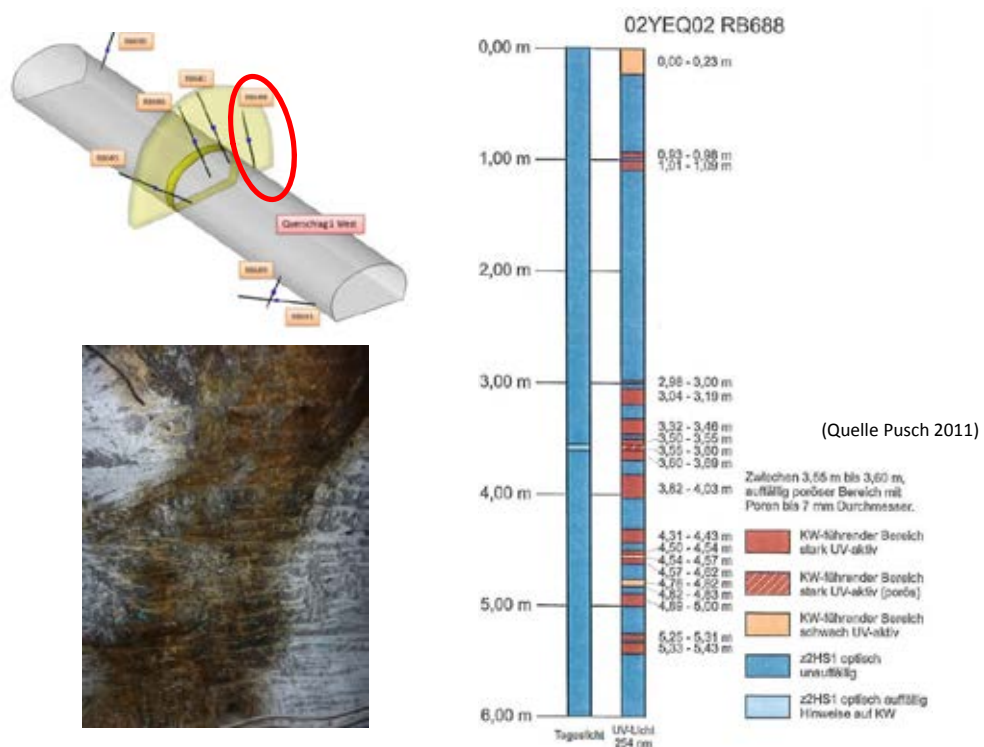


Abb. 77: Lokation und Kernbeschreibung der Bohrung RB688 (oben links: Schema zur Lage der Packerbohrungen im Umfeld des Q1W; unten links: Photo des Streckenstoßes im Bereich der Bohrung RB688, Breite des Photos ca. 1,5 m; rechts: Dokumentation der Bohrkern aus der Bohrung RB688 unter natürlichem Licht (links) und UV-Strahlung (rechts), aus: HAMMER et al. 2012).

Nach dieser Methode wurden die theoretischen Einflussvolumina und Einflussradien der fünf Bohrungen RB685, RB686, RB687, RB688 und RB689 in Abhängigkeit von der Zeit bis zum 06.07.2012 abgeschätzt. Zeitbezogene Darstellungen der geschätzten Einflussradien und Einflussvolumina enthalten die Abb. 78 und Abb. 79.

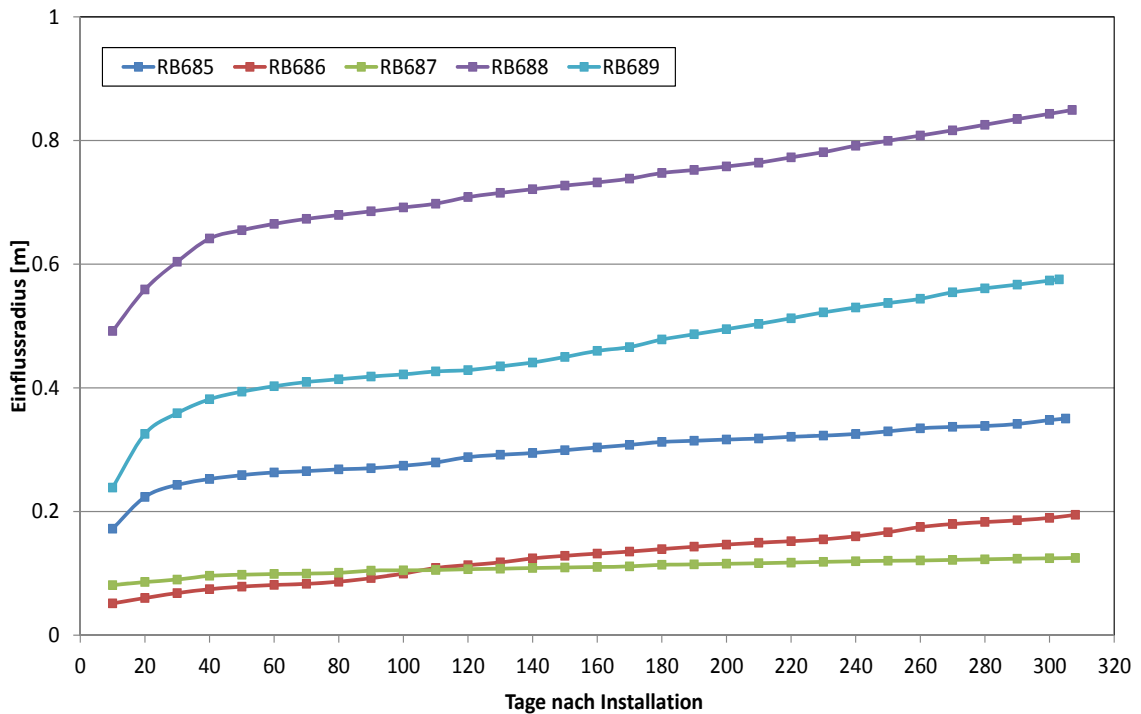


Abb. 78: Theoretischer Einflussradius im Gebirge um die KW-Packerbohrungen.

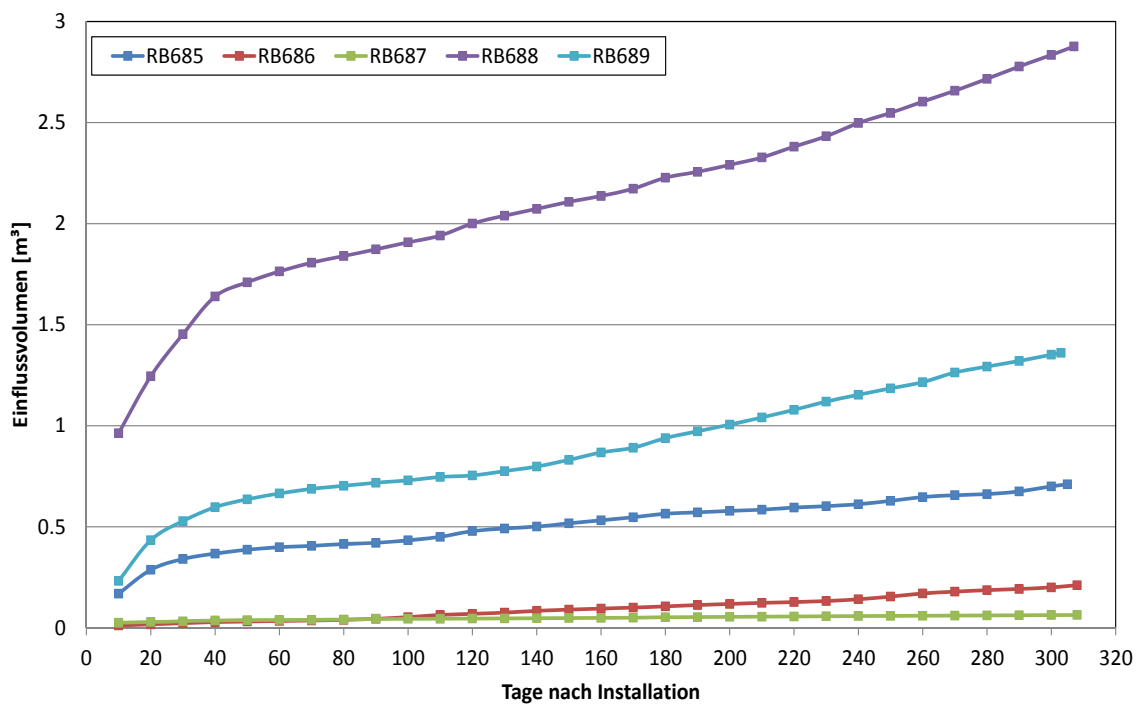


Abb. 79: Theoretisches Einflussvolumen im Gebirge um die KW-Packerbohrungen.

9.5 Quantifizierung der Kohlenwasserstoff-Zutrittsraten

Aufgrund des vom Bergamt auf maximal 10 bar beschränkten Intervalldrucks für das eingesetzte Packersystem, müssen für einige Packerbohrungen sehr häufig Druckentlastungen vorgenommen werden. Zwischen zwei Entlastungen existiert eine Druckaufbaukurve, was eine z. T. sehr große Anzahl von Druckaufbaukurven zur Folge hat. Bis zum 30.09.2012 sind zum Beispiel in der Bohrung RB688 insgesamt 206 Druckaufbaukurven registriert worden. Werden die einzelnen Druckanstiege auf die jeweiligen Zeitbasen normiert, ergibt sich eine spezifische Druckanstiegsrate (bar/Tag bzw. bar/h). Aus der Darstellung der Druckanstiegsraten in Abhängigkeit von der Reihenfolge der Druckanstiege (Abb. 80) sind für alle vier detailliert betrachteten Bohrungen zwei ausgeprägte Phasen zu unterscheiden. In der Anfangsphase fallen die Druckanstiegsraten mit fortschreitender Dauer signifikant ab und die Varianz der Messwerte ist gering. Diese Feststellung trifft besonders auf die Bohrungen RB688 und RB689 zu. In einer zweiten Phase nimmt die Varianz der Druckanstiegsraten zu und die Druckanstiegsraten sind annähernd konstant. Inwieweit der Zeitpunkt dieser Änderung in den Druckanstiegsraten mit der örtlichen Verteilung der KW im Gebirge korrelierbar ist, bedarf weiterer Auswertungen. Möglicherweise kommt der Gaszutritt in der Anfangsphase aus dem Nahbereich der Bohrung (Auflockerungszonen durch das Bohren), während der Gaszutritt in der späteren Phase weiter entfernten Bereichen entstammt.

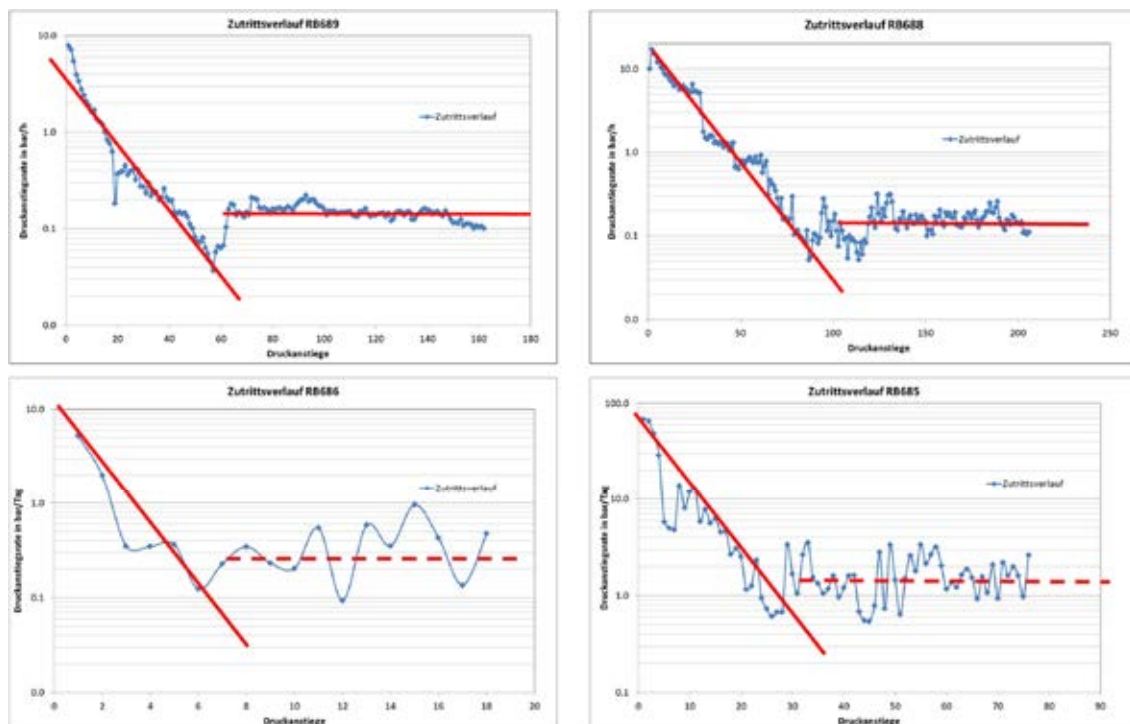


Abb. 80: Gegenüberstellung zweier ausgewählter Druckaufbaukurven und der Zutrittsraten für die Bohrung RB688 vom Oktober 2011 bzw. 2012.

In Abb. 81 sind beispielhaft zwei Druckanstiege (Nr. 85 vom 10.10.2011 und Nr. 208 vom 05.10.2012) aus der KW-Packerbohrung RB688 als Funktion der Zeit dargestellt. Die beiden, in blau gehaltenen Druckanstiege aus den Jahren 2011 bzw. 2012 werden jeweils durch die aus den Gasdrücken berechneten Massenflussraten ergänzt. Aus dem Vergleich der Kurvenverläufe in Abb. 81 ist ersichtlich, dass die beiden Druckanstiege innerhalb der ersten 20 Stunden nahezu identisch sind. Allerdings ist nach ca. 20 Stunden die dem Druckanstieg aus dem Jahr 2012 entsprechende Zutrittsrate höher als die des Druckanstiegs in 2011.

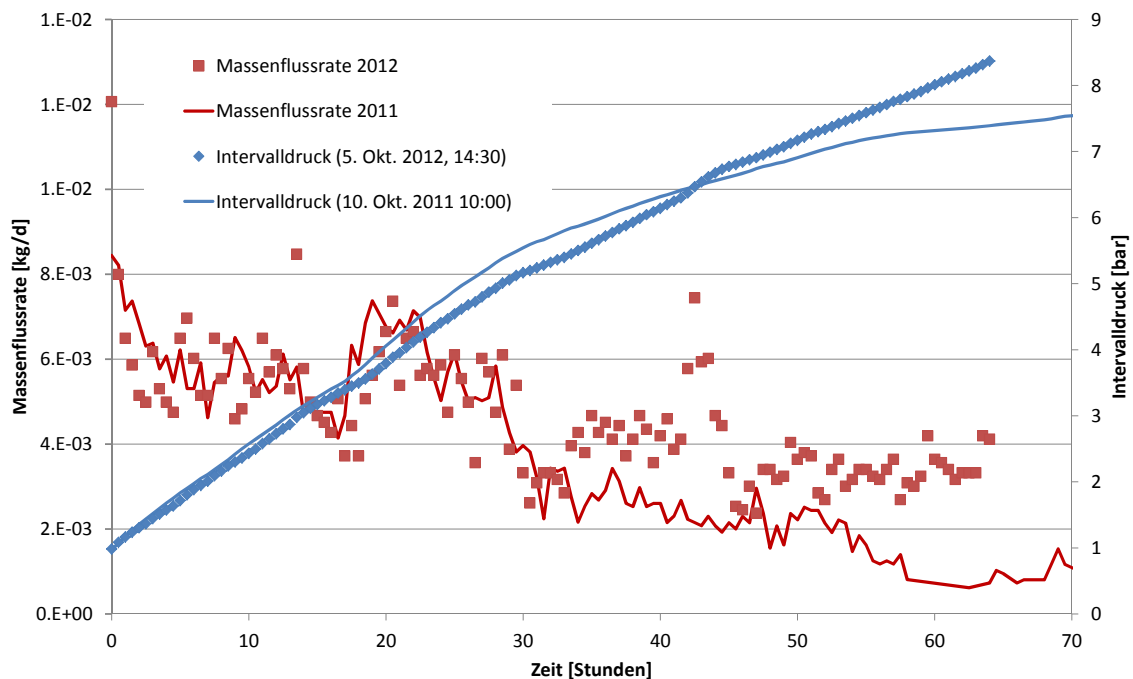


Abb. 81: Gegenüberstellung zweier ausgewählter Druckaufbaukurven und der Zutrittsraten für die Bohrung RB688 vom Oktober 2011 bzw. 2012.

9.6 Isoliertheit/Konnektivität der Kohlenwasserstoff-Vorkommen

Wie in HAMMER et al. (2012) berichtet, kommen KW-auffällige Bereiche makroskopisch oft in Form von isolierten Einschlüssen vor. Der Abstand zwischen den einzelnen KW-Vorkommen variiert teilweise deutlich. Um die Konnektivität zwischen einzelnen, räumlich eng beieinander liegenden KW-Vorkommen zu untersuchen, sind paarweise angeordnete Packerbohrungen mit unterschiedlichen Abständen gestoßen worden. Der Abstand zwischen den Bohrungen RB684 und RB763 beträgt zum Beispiel ca. 10 m, jener zwischen der RB683 und der RB684 ca. 6 m (siehe HAMMER et al. 2012). Der Abstand zwischen den fünf Bohrungen RB685 bis RB689 in der Nähe der Zutrittsstelle RF81 (siehe BfS 2002) beträgt

zwischen 2,5 und 5 m. Am kleinsten ist der Abstand der abgepackerten Bohrungsbereiche zwischen den Bohrungen RB689 und RB691 mit rund 0,6 m (Abb. 82).

Während in der Bohrung RB689 ein sehr intensiver Druckaufbau (mit notwendigerweise häufigen Druckentlastungen) dokumentiert wurde, blieb der Druck in der Bohrung RB691 von diesen Druckwechseln unbeeinflusst. Daher ist eine Konnektivität des in der Bohrung RB689 detektierten KW-Vorkommens zur Bohrung RB691 mit den bislang gewonnenen Daten nicht erkennbar. Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass ein Druckaufbau in den Bohrungen nur dann erfolgt, wenn ein KW-imprägnierter Bereich unmittelbar durch die Bohrung selbst oder auch mittelbar durch die Auflockerungszone der Bohrung aufgeschlossen wird. Bereits bei einem kleinen Abstand der Bohrung zum Imprägnationsbereich können die KW aufgrund der geringen Permeabilität des Steinsalzes trotz des Druckaufbaus in der Bohrung nicht in die daneben liegende Bohrung migrieren. Dieser Abstand kann im Moment noch nicht näher quantifiziert werden, beträgt in dem hier beschriebenen Fall aber maximal 0,6 m. Der schlagartige Druckanstieg in der Druckkurve der Bohrung RB691 (rotmarkierte Linie in Abb. 82) ist auf einen Injektionstest zurückzuführen. Danach wurde der Packer leicht nachgespannt. Die gemessenen Druckwerte lagen weiterhin unter 0,2 bar.

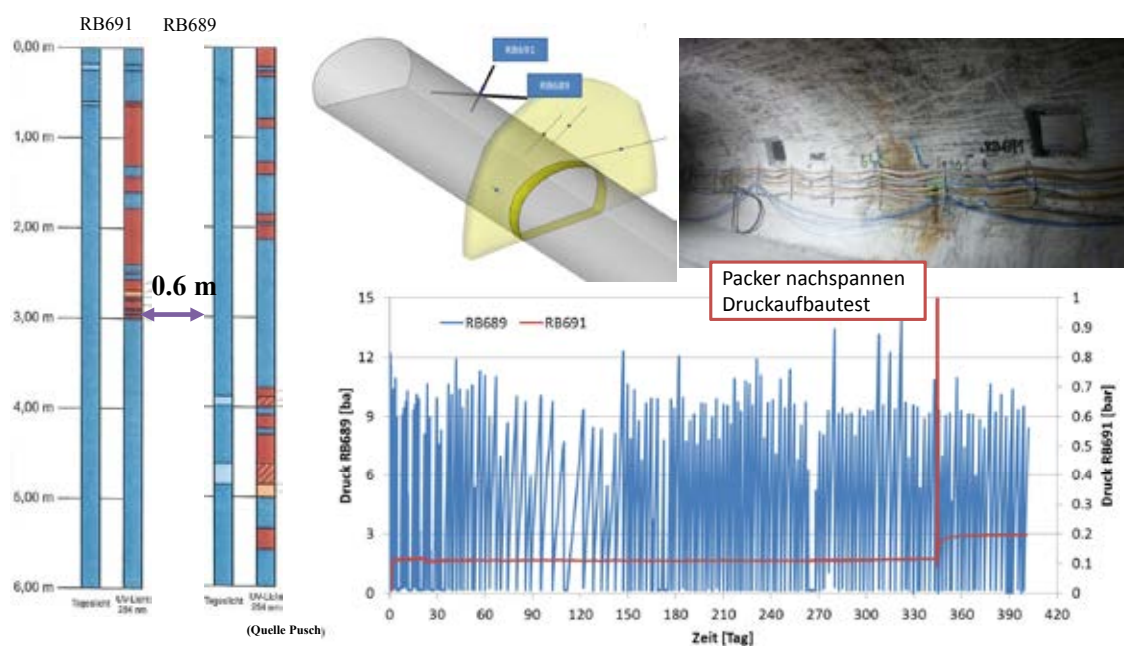


Abb. 82: Kerndokumentation (links), Lokation und Anordnung (mittig und rechts oben) und Druckaufbaumessungen für die Bohrungen RB689 und RB691.

9.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

In den Jahren 2011 und 2012 sind alle 20 geplanten KW-Packerbohrungen erstellt und instrumentiert worden. Die eingesetzten Packersysteme erwiesen sich bis auf wenige, nur kurzfristig wirkende Ausnahmen während der gesamten Messdauer als dicht. Bei den Ausnahmen führte ein Nachspannen des Packersystems zur erforderlichen Dichtigkeit. Die installierten ex-geschützten Messanlagen (diverse Drucksensoren, Datenerfassungssystem MCC) funktionieren einwandfrei. Die durch die unterschiedlichen Leitungen getrennt gewonnenen gasförmigen und flüssigen KW-Proben weisen die geforderte Qualität für die chemische Analytik auf. Die gemessenen Druckdaten sind plausibel. Daher sind alle Anforderungen an die technische Ausführung erfüllt. Die Langzeitüberwachung kann somit weiterhin mit diesen hochauflösenden Messapparaturen erfolgen.

Auf der Basis der gemessenen Druckentwicklungen wurden die 20 bis zum Ende des Berichtszeitraumes installierten Packerbohrungen in vier Kategorien eingeteilt. Die Hälfte aller KW-Packerbohrungen (10 Bohrungen) zeigt einen sehr geringen Druckaufbau und hat bereits einen quasi-stationären Druckzustand zwischen 0,2 bar und 0,3 bar erreicht. Diese Bohrungen sind der Kategorie 1 zugeordnet und befinden sich überwiegend im Q1E. Drei Bohrungen, die der Kategorie 2 zugeordnet sind, zeigen bislang einen verhältnismäßig moderaten Druckanstieg und haben den Wert von 10 bar noch nicht erreicht. Eine dieser Bohrungen befindet sich im Q1W, eine im Bohrort 5.0 und die andere im Bohrort 3.1.

Die vier Bohrungen der Kategorie 3 befinden sich im Q1W (UV-Nische, Bohrort 1.2 sowie Zutrittsstelle RF81 im Zentralbereich des Q1W). In diesen Bohrungen wurden anfänglich starke Druckzunahmen beobachtet, die mit zunehmender Standzeit allmählich abnahmen. Darüber hinaus zeigen die Druckanstiege häufig einen stufenartigen Verlauf. Dieser stufenartige Verlauf weist möglicherweise auf kleinräumig abgegrenzte, unterschiedlich weit von der Packerbohrung entfernte Strukturen innerhalb eines KW-Vorkommens hin.

Besonders auffällig sind die Bohrungen RB685, RB688 und RB689, die der Kategorie 4 zugeordnet werden. Die zwei erstgenannten Bohrungen erfassen die Zutrittsstelle RF81 im Q1W. Auch nach gut einem Jahr sind die Zutrittsraten immer noch vergleichbar mit den anfangs beobachteten Raten. Deshalb sind regelmäßige Druckentlastungen in Abständen von zwei bis drei Tagen in allen drei Bohrungen aus Sicherheitsgründen nach wie vor unabdingbar. Die Bohrung RB688 ist die Bohrung mit der stärksten Zutrittsrate. Die durchschnittliche Zutrittsrate beträgt zurzeit ca. 5 g/Tag. Diese KW-Menge muss laut der Abschätzung des Einflussbereiches aus einer Entfernung von mindestens einem Meter von der Bohrung zuströmen. Die kumulative Gasmenge, die bis zum 30.09.2012 in der RB688 (423 Tage nach Erstellung der Bohrung) erfasst wurde, beträgt 4200 Liter unter Normbedingungen. Gleichzeitig sind 13 Liter Kondensat entnommen worden.

Die einzelnen KW-Vorkommen sind nach dem bislang gewonnenen Kenntnisstand voneinander isoliert. Es findet keine Migration statt, solange sich die KW-Vorkommen außerhalb der durch die Auffahrung und die Bohrung entstehenden Auflockerungszonen befinden. Grund ist die extrem niedrige Permeabilität im unverritzten Hauptsalz.

10 Mikroskopische Untersuchungen zum Verhalten von Fluidphasen im Knäuelsalz bei Aufheizung unter Normaldruck

Eine grundlegende Fragestellung bezüglich der Fluidodynamik innerhalb von Salzstrukturen sowie der Bewertung ihrer Barrierenintegrität liegt darin, wie sich steigende Umgebungstemperaturen und Deformation auf die im Salz gebundenen Fluidphasen auswirken. Zur Analyse des Fluidverhaltens bei erhöhten Temperaturen wurden ergänzend zu den organochemischen Untersuchungen in einer Aufheizapparatur (siehe HAMMER et al. 2012, HÄGER & OSTERTAG-HENNING 2012b) Versuche am Heiz-Kühltisch-Mikroskop durchgeführt, die sich im Wesentlichen auf das Verhalten der Korngrenzenfluide in Knäuelsalzproben aus dem Q1W im Erkundungsbergwerk Gorleben fokussierten.

10.1 Einfluss von Temperatur und Deformation auf die Fluidverteilungen in Salzgesteinen

Bezüglich des Verhaltens von Fluiden bei Temperaturerhöhung liegen für halitische Gesteine umfangreiche Beobachtungen vor. ROEDDER (1984 und darin enthaltene Literatur) beschreibt die Wanderung von intrakristallinen Fluideinschlüssen infolge erhöhter Temperaturen in Richtung der Wärmequelle durch Lösung und Wiederausfällung an den entsprechenden Rändern der Einschlüsse. Dieser Vorgang hat zur Folge, dass die intrakristallinen Fluideinschlüsse inklusive ihrer wässrigen Phasen in Richtung Korngrenzen wandern und dort gespeichert werden.

Da sich fast alle Fluidphasen des Knäuelsalzes auf den Korn- und Phasengrenzen befinden, wird in den Heiz-Kühltisch-Versuchen der Temperatureinfluss auf diese Fluidformen untersucht. Die Untersuchungen sollen außerdem Informationen dazu liefern, ob die infolge von Temperaturerhöhung ansteigenden Fluiddrücke die Neubildung bzw. Aufweitung von Rissen verursachen und die Fluide dadurch in den Salzgesteinen migrieren können, wie von SCHOENHERR et al. (2007) und BURLIGA & CZECHOWSKI (2010) für andere Salzstrukturen dargestellt wurde. Diese Beobachtungen sind allerdings an im Vergleich zu Gorleben deutlich erhöhte KW-Gehalte (größer 1 Gew.-%) und Versenkungstiefen von mehr als 3,5 km, d. h. sehr hohe Umgebungstemperaturen und -drücke gebunden.

ZULAUF et al. (2010) beobachteten im Mikromaßstab eine gering dimensionierte Mobilisierung bzw. Umverteilung von Fluiden bei der experimentellen Aufheizung und Deformation von Anhydrit im Kontakt zu Halit (Hauptanhydrit-Scheibe aus dem Salzstock Gorleben, umgeben von Asse-Steinsalzmatrix) bei 345°C. Hierbei zeigte sich, dass bei der Deformation Fluideinschlüsse besonders im Grenzbereich von Anhydrit und Halit angereichert wurden, ebenso wie in Extensionsrissen im Halit oder innerhalb entstehender Boudin-Necks (Abb. 83A). Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass bei der Boudinage der Anhydritlage die Necks mit Halit ausgefüllt wurden, die Wände offen gebliebener Hohlräume allerdings mit organischer Substanz ausgekleidet waren. Es bildeten sich von Anhydritkristallen radialstrahlig ausgehende, sehr gering dimensionierte Mikrorisse, die in die Halitmatrix hinein führten (Abb. 83B). Insgesamt zeigte sich durch erhöhte Temperaturen (345°C) eine auf den Mikrobereich beschränkte Mikrorissbildung infolge erhöhter Fluiddrücke und damit einhergehend eine Mobilisierung von Fluidphasen. Trotz dieser Mikrorissbildung und der daran gebundenen räumlich sehr begrenzten Umverteilung von Fluidphasen fungierte die Halitmatrix als impermeable Schutzhülle, auch wenn durch die Spröddeformation gering dimensionierte Fluidmigrationspfade entstehen konnten.

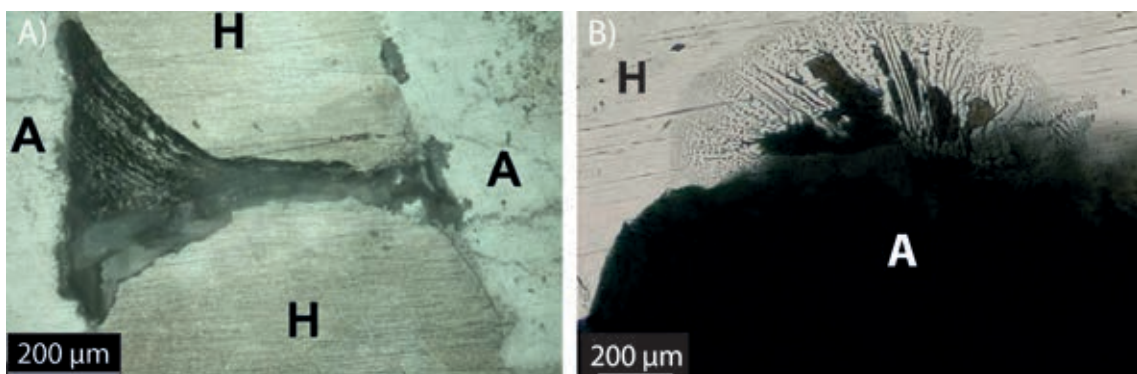


Abb. 83: Experimentell deformierte Gorleben-Hauptanhydritlage in Asse-Steinsalzmatrix (aus: ZULAUF et al. 2010).

A) Neck-Bereich einer boudinierten Anhydritlage (A). Der nicht verheilte Hohlraum zwischen viskos eingedrungenem Halit (H) ist ausgekleidet mit organischer Substanz, die offensichtlich die Verheilung lokal behinderte. Aufnahme unter Auflicht.

B) Grenzbereich von Anhydrit (A) zu Halitmatrix (H). Eine radialstrahlige Mikroriss-Bildung mit daran gebundener lokaler Fluidmigration ist ausgehend vom Anhydrit in die Halitmatrix hinein zu erkennen. Aufnahme im Durchlicht, bestehend aus 15 Einzelaufnahmen verschiedener Fokusebenen. Möglicherweise ist die Bildung der Rissfächer auf den Gewinnungsprozess der Proben (Bohren) oder die Schliffherstellung zurückzuführen.

10.2 Probenpräparation und Untersuchungsmethodik

10.2.1 Probenpräparation

Am Heiz-Kühltisch-Mikroskop können nur kleine Probenstücke analysiert werden, die als dünne Salzplättchen präpariert werden müssen, ohne auf einem Objektträger fixiert zu sein. Die Proben zur Untersuchung am Heiz-Kühltisch-Mikroskop werden in ähnlicher Weise wie die klassischen Dickschliffpräparate gefertigt. Allerdings wird zum Aufkleben der formatierten Salzklötzchen auf die Objektträger ein in Aceton löslicher Kleber verwendet. Nach dem Zuschneiden und Planschleifen des Salzplättchen-Präparates wird das fertige Präparat für einige Minuten in ein Acetonbad gelegt, bis sich das Salzplättchen vom Objektträger ablöst. Die hierbei maximal 1 mm dicken Salzplättchen werden anschließend in einzelne Stücke zerbrochen und per Hand bei 1200er und 2400er Körnung trocken poliert. So können pro Dickschliff etwa 6 Probenstücke für die Heiz-Kühltisch-Methode gewonnen werden.

10.2.2 Grundlagen und Durchführung der Heiz-Kühltisch-Experimente

Für die Untersuchungen des Temperatureinflusses auf die Fluidverteilungen wurde ein Leica-Mikroskop (DMLM) mit Heiz-Kühltisch und Thermo-Steuerereinheit (LINKAM TS 93) verwendet. Der Heiz-Kühltisch ist permanent wassergekühlt. Sein Innenraum kann durch Verwendung von Flüssigstickstoff auf unter minus 100°C gekühlt werden. Die Thermosteuerereinheit reguliert die Aufheiz- bzw. Abkühlraten und misst die Temperatur im Metallblock, der sich unterhalb des Probenschlittens befindet. Die vom Thermosteuerelement angegebene Temperatur wird am Metallblock unterhalb der Probe gemessen. Auch wenn Salz eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit besitzt, existiert eine Diskrepanz zwischen gemessener und realer Temperatur der Probe. Die gemessenen Temperaturen im Metallblock sind um etwa 10°C höher als die reale Probentemperatur, was im Wesentlichen am schnellen Aufheizprozess liegt.

Die Heiz-Kühltisch-Methode wurde an vier Proben (RB655.016_2; RB653.007; RB687.005_CT; RB652.010_2) zu je 6 bis 8 Plättchen angewendet. Jede Probe kann bei den Heiz-Kühltisch-Untersuchungen nur einmal verwendet werden, da nur nach der ersten Aufheizung reversible Prozesse der Fluidumverteilung beobachtet werden können. Die Aufheizung aller Proben erfolgte mit einem Gradienten von 25°C pro Minute auf ein Temperaturplateau von 250°C, das für etwa 10 Minuten gehalten wurde. In 10°C-Schritten wurden während des Heizvorgangs Aufnahmen angefertigt, um die Veränderungen in den Fluidverteilungen schrittweise verfolgen zu können. Der Abkühlvorgang wurde von 250°C auf 80°C als Film aufgezeichnet, um eventuelle reversible Fluidbewegungen festzuhalten. Nach Erreichen der Ausgangstemperatur von etwa 20°C wurden erneut Photoaufnahmen angefertigt, um die Fluidverteilung vor und nach der Aufheizung vergleichen zu können.

10.3 Untersuchungsergebnisse

Bei der Untersuchung der Hauptsalzproben mittels Heiz-Kühltisch-Mikroskop zeigt sich eine deutliche temperaturbedingte Ausdehnung des Halits. Zum einen verändert sich die Fokusebene des zu untersuchenden Objektes in der Probe und zum anderen driftet der Bildausschnitt schon bei einer Temperaturerhöhung von 10°C, sodass ein permanentes Nachfokussieren und teilweise ein Neuzentrieren der Probe nötig ist.

Die Aufheizversuche an den Proben des Knäuelsalzes dokumentieren den Einfluss erhöhter Temperatur auf den Kornverband und die Fluidverteilungen entlang von Korngrenzflächen und speziell an Anhydritkristallen oder -Nestern. Ein Phänomen, das bei allen im Heiz-Kühltisch-Mikroskop untersuchten Proben beobachtet wurde, ist ein Verdunkeln des Schliffbildes. Diese Beobachtung konnte schon für die in der thermomechanischen Apparatur der Universität Frankfurt/M. aufgeheizten Proben beschrieben werden (siehe HAMMER et al. 2012). Jeder Dickschliff zeigte infolge der Aufheizung eine charakteristische matt-schwarze Trübung der Fluidphasen, die ansonsten aber keine Unterschiede zu den nicht-aufgeheizten Proben aufwiesen.

Im Ergebnis der Aufheizversuche zeigen die Anhydritkristalle in den meisten untersuchten Proben eine temperatur-induzierte Mikrorissbildung (Abb. 84).

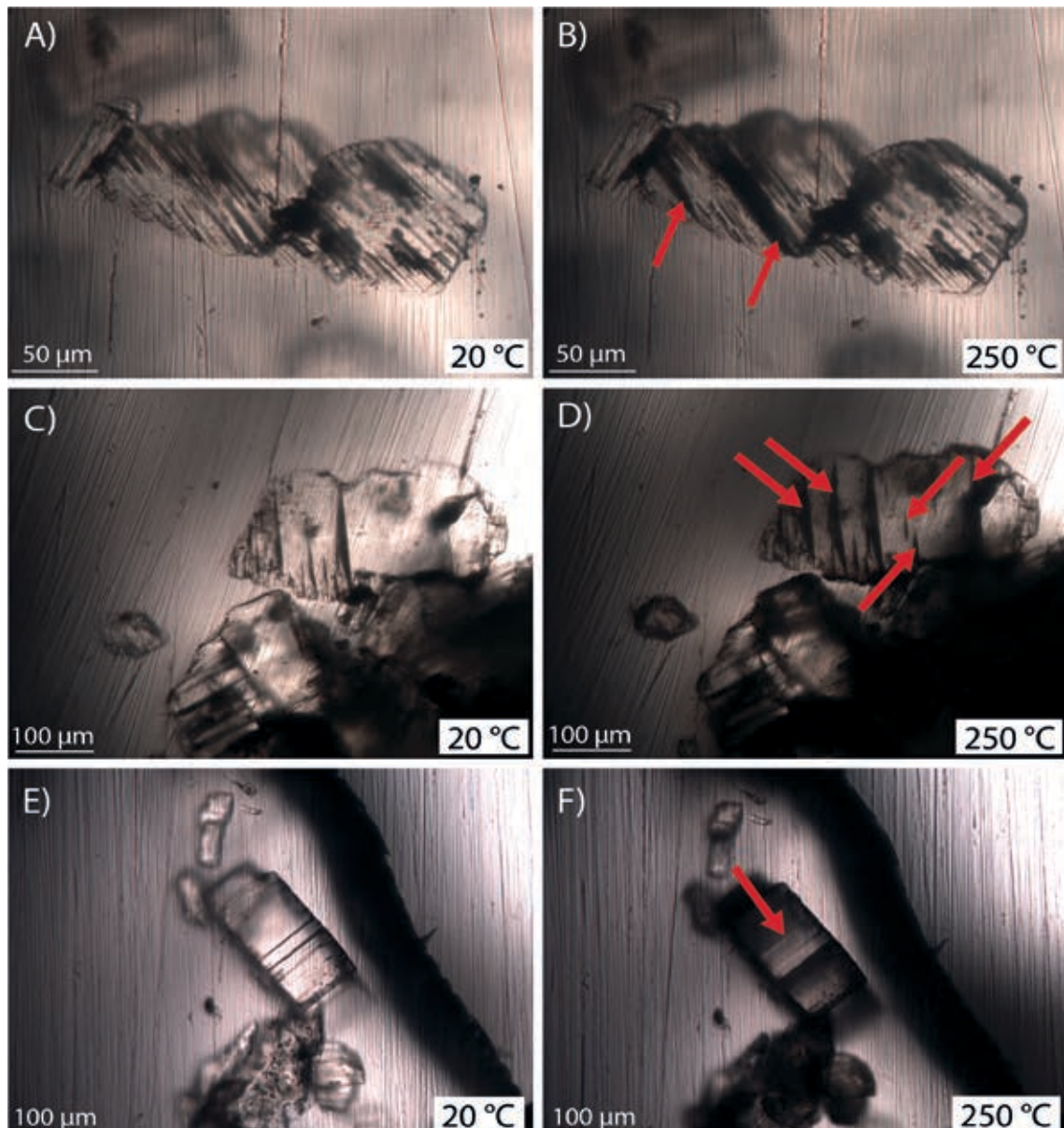


Abb. 84: Mikrorissentwicklung und Fluidwanderung innerhalb von Anhydritkristallen bei Aufheizung von 20°C (A, C und E) auf 250°C (B, D und F). Probe RB652.010_2_2. Die Photos A) und B) zeigen ein sukzessives Ausbreiten von dunklen Fluidfilmen (Pfeile) innerhalb der Anhydritkristalle bei steigender Temperatur. Es findet keine Fluidausbreitung in die umgebende Halitmatrix statt. C) und D) bis 250°C bildeten sich entlang der Spaltflächen mit Fluid gefüllte Risse (Pfeile). Eine Verdunkelung speziell im Bereich des Anhydritclusters (rechts unten) ist charakteristisch bei erhöhten Temperaturen. Probe RB653.007_4. E) und F) Der Anhydritkristall weist eine Verdunkelung und die Ausbildung eines neuen Risses entlang einer Spaltfläche (Pfeil) auf. Ein vorhandener Mikroriss (entlang einer Spaltfläche) und der Grenzbereich von Anhydrit zu Halit erscheinen bei 250°C (F) deutlich dunkler. Probe RB653.007_2 (Photos: N. Thiemeyer).

Die aufgenommenen Bildsequenzen zeigen ab einer Temperatur von 70°C, im Ausnahmefall auch schon bei etwa 50°C, vermehrte Mikrorissbildung entlang von Spaltflächen. Eine exakte Angabe, bei welchen Temperaturen sich der Großteil der Mikrorisse gebildet hat, ist z. Zt. noch nicht möglich. Die durch die Temperaturerhöhung induzierten Mikrorisse entlang der Spaltflächen der Anhydritkristalle bieten Platz für die Flüssigkeits- und Gasphasen und werden sofort während ihrer Entstehung mit Fluid gefüllt. Dabei können sich die Mikrorisse auch sukzessive in Etappen bilden bzw. verbreitern (Abb. 85). Vermutlich handelt es sich um eine passive Fluidmigration, die durch die Mikrorissbildung induziert wird. Die Mikrorissbildung ist vermutlich nicht auf Fluidüberdrücke, sondern auf unterschiedliche Wärmeausdehnungseigenschaften von Halit und Anhydrit zurückzuführen, wodurch Fluidphasen in neu geschaffene Wegsamkeiten eindringen können. Die bei hoher Temperatur aufgrund von Mikrorissbildung veränderte Fluidverteilung bleibt nach der Abkühlung auf Ausgangstemperatur prinzipiell unverändert, sodass es sich bei der mikrorissinduzierten Fluidmigration um einen irreversiblen Prozess handelt.

Die mit Fluiden gefüllten Mikrorisse in den Anhydritkristallen bleiben in den von Halit umgebenen Anhydritkristallen allerdings weiterhin isoliert. Die Fluide können nicht in die Halitmatrix vordringen, da Mikrorissbildung im Halit bei den untersuchten Proben nicht aufgetreten ist (Abb. 84 und Abb. 85). Die Schwärzung der Proben ist im Wesentlichen auf die fluidgefüllten Mikrorisse in den Anhydritkristallen zurückzuführen, auch wenn lokal Fluidfilme entlang von Halitkorngrenzen entstehen können, wenn diese bei steigender Temperatur aufgeweitet werden.

Kornrenzfluide auf den Korngrenzen der Halite bleiben generell unbeeinflusst von erhöhter Temperatur. Die in HAMMER et al. (2012) beschriebenen Blasen- und Streifenmuster zeigen keinerlei Reaktion auf die Temperierung, solange die Korngrenze intakt bleibt. Weitet sich die Korngrenze allerdings aufgrund der starken Ausdehnung des Salzes infolge sich verändernder Spannungsverteilungen innerhalb des Kornverbandes, so wird in der Regel ein dünner Fluidfilm ausgebildet, der die anwesenden Fluideinschlüsse umkleidet und, ebenso wie die Fluidumverteilungen innerhalb der Anhydritkristalle, das Schliffbild verdunkelt (Abb. 86).

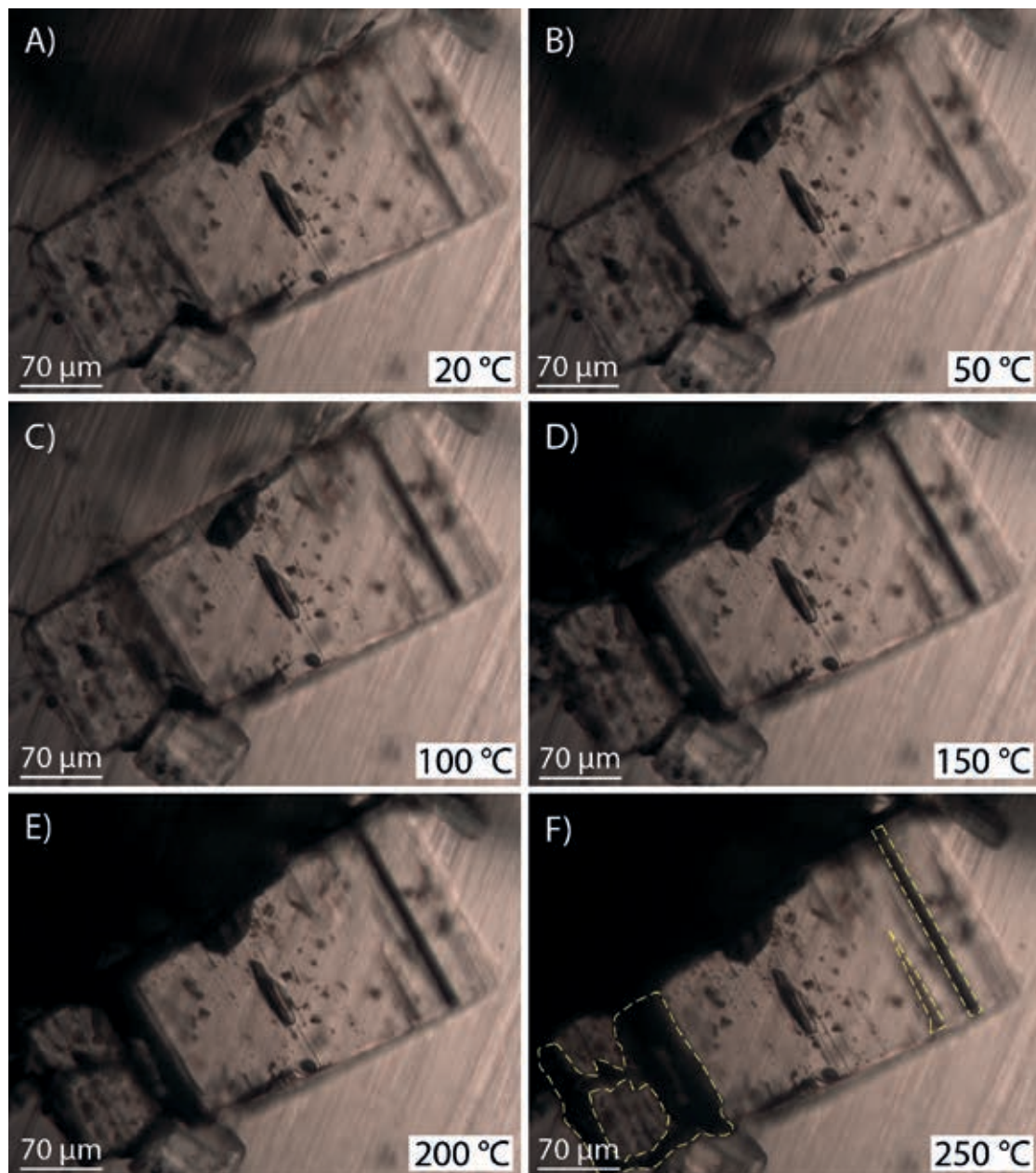


Abb. 85: Schrittweise Darstellung der Entwicklung eines Dünnschliff-Bereiches der Probe RB687.005_CT_2 bei steigender Temperatur. Die bei 250°C entstandenen Fluidmuster (F, gelbe Signatur) sind unter A) bei 20°C bereits teilweise ausgebildet. Die klaren Fluidmuster im Zentrum des Anhydritkristalls verändern sich bei der Aufheizung nicht. Ebenso migrieren keine Fluidphasen in die Halitmatrix. Die Verdunkelung zeigt sich vor allem bei den in einer anderen Fokusebene liegenden Anhydritkristallen (links oben). Unter C) zeigt sich bis 100°C ein leichtes Hellerwerden dieses Abschnittes, bis dann bei 250°C dieser komplett verdunkelt ist. Hierbei könnte es sich zuerst um eine Umverteilung von Fluiden handeln und dann final um Mikrorissbildungen, die beträchtliche Fluidanteile in die Anhydritnester migrieren lassen (Photos: N. Thiemeyer).

Ein Aufbrechen von Halitkorngrenzen ist durch eine sprunghafte Ausbildung eines dunklen Films (RB655.016_2_5 bei etwa 190°C, siehe Abb. 86) zu erkennen. Allerdings bleiben selbst bei geweiteten Korngrenzen im Halitkorn die Fluidverteilungen bei intakten

Korngrenzen unverändert. Aufgrund der großen Oberfläche und der spaltflächengebundenen Mikrorissentwicklung in Anhydritkristallen ist die Schwärzung in den anhydritreichen Partien der Proben am deutlichsten.

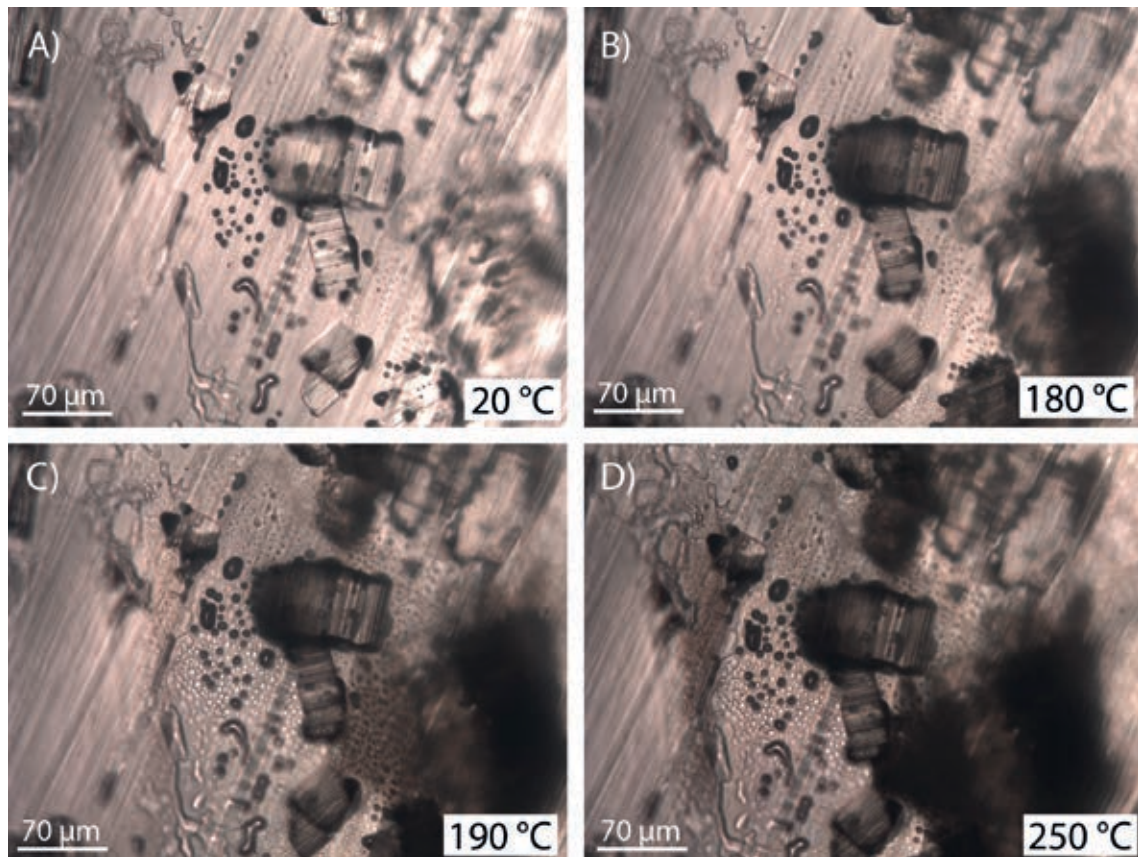


Abb. 86: A) Halitkorngrenze mit Anhydritkristallen in der Probe RB655.016_2_5 mit dunklen Fluideinschlüssen in Tropfenform und helleren Schlieren bei 20°C. Im Zuge der Aufheizung tritt eine Verdunkelung bis 250°C (D) ein. Beim Übergang von B) zu C) zeigt sich eine plötzliche Veränderung der Fluidverteilungen bei 180-190°C, die vermutlich durch das Aufweiten der Halitkorngrenze verursacht wird. Die schwarzen Fluideinschlüsse werden dabei von einem dünnen Fluidfilm umflossen und bleiben ortsfest. Die Quelle des Fluidfilms wird im Bereich der Anhydritkristalle (rechts unten) vermutet (Photos: N. Thiemeyer).

Die Probe RB655.016_2_1 zeigt während der Aufheizung eine Veränderung des Fluidinventars der untersuchten Halitkorngrenze. Während die größeren Fluideinschlüsse ihre Form und Position bei bis zu 250°C nicht verändern, verschwinden kleinere Fluidphasen während des Aufheizprozesses (Abb. 87); dieses Phänomen ist jedoch reversibel. Das ursprüngliche Verteilungsmuster der bei hohen Temperaturen umverteilten Einschlüsse wird beim Abkühlprozess formgetreu wiederhergestellt. Durch das Wiedereinnehmen der ursprünglichen Positionen kann davon ausgegangen werden, dass Position und Form der Fluideinschlüsse in diesem Fall mit morphologischen Unebenheiten der Halitkristalloberfläche zusammenhängen.

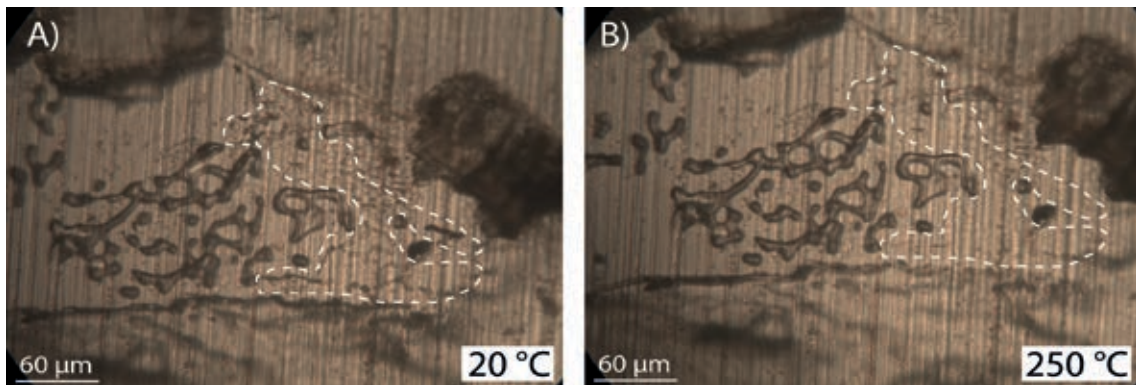


Abb. 87: Flachliegende Halitkorngrenze mit Fluideinschlüssen in der Probe RB655.016_2_1. Eine Verdunkelung ist hier nur marginal im Bereich des Anhydritkristalls am oberen linken Bildrand unter B) zu erkennen. Die weiße Signatur markiert den Bereich der Korngrenzfluide, die bei Aufheizung auf 250°C verschwinden. Bei Abkühlung zurück auf Raumtemperatur nehmen diese Fluide wieder die exakte Ausgangsposition wie unter A) ein. Es handelt sich somit um einen reversiblen Prozess, der bei fehlender Mikrorissbildung weitläufige Fluidmigration ausschließt. Die großen Korngrenzfluide bleiben während der gesamten Aufheizphase unverändert in Lage und Form (Photos: N. Thiemeyer).

10.4 Diskussion der mikroskopischen Beobachtungen

Ein genau einzugrenzender Temperaturbereich von wenigen Grad Celsius, bei dem Mikrorissbildung bzw. -aufweitung im Anhydrit beginnt, kann nicht bestimmt werden. In der Regel sind im Anhydrit deutliche Mikrorissbildungen bzw. -aufweitungen ab ca. 70°C festzustellen, in Ausnahmen wie bei der Probe RB652.010_2_4 schon bei 50°C. Teilweise werden Mikrorisse erst während der Haltephase der Maximaltemperatur von 250°C generiert. Die Hauptmikrorissbildung ist aber bei etwa 200°C abgeschlossen. Hauptgrund für das scheinbar breite Temperaturintervall der Mikrorissbildung sind demnach vermutlich unterschiedliche Spannungszustände der Korngrenzflächen zwischen Halit und Anhydrit. Bereiche höherer Spannungen dekrepitieren vermutlich früher. Des Weiteren deutet das breite Temperaturintervall für die induzierte Mikrorissbildung darauf hin, dass es sich um passiven Fluidtransport handelt und nicht um Phasenumwandlungen der Flüssigkeitseinschlüsse oder aktives Aufbrechen der Anhydritkristalle durch erhöhte Fluiddrücke. Letzteres würde eine eindeutigere Temperaturschwelle erkennen lassen, ab der Risse generiert würden. Außerdem sprechen die sich bei niedrigen Temperaturen bildenden Mikrorisse gegen hohe Fluiddrücke, da unter Gebirgsdruck eingeschlossene Fluide unter Laborbedingungen durch einen deutlichen Unterdruck charakterisiert sind und erst bei sehr hohen Temperaturen signifikante Fluiddrücke entstehen würden.

Jede unter dem Heiz-Kühltisch-Mikroskop untersuchte Probe zeigte eine charakteristische Schwärzung, auch wenn eine auf die Temperaturerhöhung zurückzuführende Mikrorissbildung teilweise nicht zu erkennen war. Die Mikrorissbildung ist auf die Anhydritkristalle

oder auf Halitkorn Grenzen begrenzt, die sich durch die thermische Ausdehnung der Halitkristalle aufweiten. Risse in Halitkristallen, die von Anhydriteinschlüssen ausgehen, sind weder in den Dickschliffen der aufgeheizten Klötzchen noch in den Heiz-Kühltisch-Proben zu erkennen. Reversible Fluidmigrationsprozesse (RB655.016_2_1, siehe Abb. 87) sind dort zu beobachten, wo keine Rissbildung stattfindet. Dementsprechend ist die Mikrorissbildung bzw. -aufweitung in Anhydritkristallen der entscheidende Faktor für eine Umverteilung von Fluidphasen und nicht die Migration entlang von intakten Halitkorn Grenzen. Das bei Abkühlung wiederherstellbare ursprüngliche Fluidmuster beweist, dass in diesen Fällen die Migration von Fluiden über extrem kurze Distanzen verläuft und keine weitläufige Verbreitung stattfindet. Auch die Probe RB655.016_2_5 deutet auf einen geringen Transport der Korn Grenzenfluide hin. In dieser Probe bricht die Halitkorn Grenze bei einer Temperatur zwischen 180°C und 190°C auf und wird mit einer fluiden Phase belegt. Die Korn Grenzenfluide bleiben jedoch ortsfest, werden umflossen und migrieren selber nicht. In allen untersuchten Proben verändern sich die im Ausgangszustand entlang von Korn- und Phasengrenzen beobachteten Einschlussmuster nicht, was entweder auf Fluidunterdruck oder auf eine morphologisch bedingte Position der Einschlüsse auf den Kristallkorn Grenzen hindeutet.

Die Probe RB655.016_2_1 zeigt nach der Abkühlung exakt das gleiche Ausgangsmuster der ursprünglichen Fluidverteilungen. Da ein erhöhter Fluiddruck als treibende Migrationskraft auszuschließen ist, handelt es sich vermutlich um eine bei Abkühlung langsam schließende Halitkorn Grenze, wobei einzelne Fluidstränge und -blasen in benachbarte Korn Grenzen abgepresst werden. Dass es sich um einen reversiblen Prozess handelt und die Fluidverteilungsmuster beim Abkühlen durch einziehendes Fluid sukzessive wieder hergestellt werden, unterstützt die Annahme einer unebenen Halitkristallfläche mit vorgezeichneten Fluidpositionen und kurzen Migrationswegen im Bereich intakter Kornverbände.

Die Dickschliffanalysen der im Ofen und in der thermomechanischen Apparatur der Universität Frankfurt/M. aufgeheizten Salzklötzchen zeigen weniger Mikrorisse in den Anhydriten als die mittels Heiz-Kühltisch untersuchten Proben, auch wenn eine Schwärzung der Proben durch beide Methoden induziert wird. Diese Feststellung belegt, dass die gewählten Aufheizraten der Heiz-Kühltisch-Methode extrem auf den Kornverband von Salz und Anhydrit einwirken. Langsameres Aufheizen führt demnach zu verringerter Mikrorissbildung. Ein wichtiger Einflussfaktor, der unter den Laborbedingungen der Heiz-Kühltisch-Methode nicht simuliert werden kann, ist der Gebirgsdruck. Hohe Umgebungsdrücke wirken einer Rissbildung im Salz entgegen. Die im Mikroskop beobachteten irreversiblen Prozesse von Korn Grenzaufweitungen und Mikrorissbildungen bzw. -aufweitungen kommen in Anhydritkristallen unter In-situ-Bedingungen, wenn überhaupt, nur untergeordnet vor.

10.5 Schlussfolgerungen

Die Aufheizung der Proben im Heiz-Kühltisch-Mikroskop bis 250°C führt bei Normaldruck zu Mikrorissbildung bzw. -aufweitung in Anhydritkristallen und aufgeweiteten Halitkorngrenzen. Die im Anhydrit entstehenden Mikrorisse, meist entlang der Spaltflächen, werden umgehend mit Fluid gefüllt. Die Mikrorissbildung bzw. -aufweitung ist über ein breites Temperaturintervall zu beobachten und vermutlich auf unterschiedliche Spannungszustände zwischen Halit und Anhydrit zurückzuführen.

Außer der Mikrorissbildung bzw. -aufweitung in Anhydritkristallen oder aufgeweiteten Halitkorngrenzen zeigen die blasen- oder streifenförmigen Korngrenzfluidmuster keine Reaktion auf erhöhte Temperaturen. Es handelt sich um dünne Fluidfilme, die eventuell aus einer instabilen Position durch Platzangebot und Unterdruck in neu geschaffene Räume gezogen werden.

Mikrorissbildungen bzw. -aufweitungen sind nach den Analysen mit Hilfe des Heiz-Kühltisches die wichtigsten Prozesse für die im Schliff beobachtete Umverteilung oder Migration von Fluiden über kurze Distanzen. Allerdings sind die Heiz-Kühltisch-Analysen unter Laborbedingungen nur eingeschränkt mit den Bedingungen in natürlichen Salzformationen zu vergleichen. Unter Laborbedingungen fehlt der Umgebungsdruck, wodurch eine thermisch-bedingte Ausdehnung der Proben möglich ist. Außerdem sind die Aufheizraten deutlich höher als bei dem zu erwartenden Temperaturanstieg im umgebenden Salz nach der Einlagerung radioaktiven wärmeentwickelnden Materials. Da eine In-situ-Rissbildung unter Gebirgsdruck außerhalb der Auflockerungszone z. B. an sehr hohe Porenfluiddrücke gekoppelt sein muss, kann mit der bei den Aufheizprozessen beobachteten Ortsgebundenheit der Fluideinschlüsse auf Korn- und Phasengrenzen gezeigt werden, dass eine Temperaturerhöhung nur zu einer geringfügigen Fluidmigration führt. Geringe Aufheizraten und hohe Umgebungsdrücke sollten in Salzgesteinen mit derartig geringen KW-Gehalten einer Rissbildung und einer Umverteilung oder Migration von wässrigen Fluidphasen bzw. KW entgegenwirken.

11 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Zwischenberichtes zu den im Arbeitspaket 9GE332300000 - „Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben“ im Jahr 2012 durchgeführten Untersuchungen werden neue, die Befunde aus dem Jahr 2011 (HAMMER et al. 2012) ergänzende Erkenntnisse zur KW-Führung des Staßfurt-Hauptsalzes im Salzstock Gorleben dargestellt. Neben der Ermittlung der Gehalte, Zusammensetzungen und räumlichen Verteilung der KW bilden petrographisch-mikrostrukturelle Analysen, In-situ-Untersuchungen zur Bestimmung der Zusammensetzung und Größe der KW-Vorkommen sowie Heiz-Kühltisch-Experimente zum Verhalten der KW bei Aufheizung bis 250°C die Schwerpunkte der im Berichtszeitraum realisierten Arbeiten.

Zur Erforschung der räumlichen Anordnung der KW im Mikrogefüge der Salzgesteine und zur Klärung des Einflusses von Deformationsprozessen auf die KW-Verteilung wurden neben mikroskopischen Untersuchungen auch mikrostrukturelle Analysen mittels *electron backscatter diffraction (EBSD)*, Paläopiezometrie sowie computertomographische Studien und Untersuchungen mittels Confocal Laser Scanning Microscope durchgeführt.

Die mikroskopischen Studien ergaben, dass die KW im Staßfurt-Hauptsalz überwiegend an die Korngrenzen von Halit- und Anhydritkristallen in rekristallisierten Steinsalzbereichen sowie untergeordnet in Kapillaren von Anhydritkristallen oder in sekundären, auf den Bohrprozess und/oder die Probenpräparation zurückzuführenden Rissen gebunden sind. Nur sehr vereinzelt werden gering dimensionierte KW-Einschlüsse im Streifensalz (z2HS2) und im Kristallbrockensalz (z2HS3, im Bohrort 5.0) festgestellt. Die KW sind sehr ungleichmäßig, nestartig v. a. über das Knäuelsalz (z2HS1) verteilt. Bei den durch Bohrungen nachgewiesenen KW-Vorkommen handelt es sich um voneinander isolierte KW-Anreicherungen. Die KW-Vorkommen sind vermutlich entlang von ehemaligen, früh-halokinetisch entstandenen Scher- und/oder Bewegungsbahnen angeordnet, die beim Salzaufstieg temporär die Migration von Fluiden ermöglichten und nachfolgend durch das Salzkriechen verheilten, später bei der Fortsetzung des Salzaufstiegs zerrissen wurden und zum heutigen Zeitpunkt sehr heterogen im Staßfurt-Hauptsalz verteilt sind.

Die Knäuel- und Streifensalzproben aus dem Salzstock Gorleben zeigen in der Regel ausgeprägte Subkorngefüge. Es werden neue Daten zu den auf der Grundlage von Subkornanalysen bestimmten Paläodifferentialspannungen präsentiert, die Schlussfolgerungen zu den abgelaufenen Deformationsprozessen ermöglichen. Unter Berücksichtigung der EBSD-Messungen zeigt sich, dass wahrscheinlich Kombinationen unterschiedlicher Deformationsmechanismen, wie Versetzungsbewegungen, Lösungs-Fällungs-Kriechen und fluidunterstützte dynamische Rekristallisation gewirkt haben. Die berechneten mittleren Paläodifferentialspannungen schwanken zwischen 0,82 MPa und 1,29 MPa für das Knäuelsalz (bei einer Ausreißerprobe mit 1,76 MPa) und zwischen 1.25 MPa

und 1,62 MPa für das Streifensalz. Die Tendenz zu leicht höheren Spannungen im Streifensalz ist noch nicht statistisch abgesichert. Eine Tendenz zur Änderung der Paläodifferentialspannungen in Abhängigkeit von der räumlichen Lage der Steinsalzproben ist derzeit nicht erkennbar. Die mikrostrukturellen Untersuchungen erbrachten bisher keine Belege für die Bindung größerer KW-Einschlüsse an Bereiche, die durch hohe oder sehr niedrige Paläodifferentialspannungen gekennzeichnet sind.

Die Subkorngefüge wurden ergänzend durch EBSD-Messungen untersucht, wobei sich die Deformationsgefüge des Knäuelsalzes deutlich von denen des Streifensalzes unterscheiden. Alle mittels EBSD untersuchten Halitkristalle zeigen infolge der halokinetischen Deformation Kristallgitterverbiegungen. Die Streifensalzproben zeigten trotz deutlicher Subkorngefüge keine Hinweise auf Rotation der Subkörner. Dagegen zeigte sich bei den Proben aus dem Knäuelsalz, dass Subkornrotations-Rekristallisation als Deformationsmechanismus stattgefunden hat. Möglicherweise könnten erhöhte KW-Gehalte Deformationsmechanismen wie Korngrenzenmigration oder Lösungs-Fällungs-Kriechen behindern und die Bedingungen für Subkornrotations-Rekristallisation verbessern. Die Halitgroßkristalle des Knäuelsalzes haben kristallplastische Deformation erfahren und sind somit keine Produkte statischer Rekristallisation und nicht durch reines Lösungs-Fällungs-Kriechen deformiert worden. Ob die KW-Imprägnationen bestimmte Deformationsmechanismen begünstigten oder ob unterschiedliche deformative Prozesse bzw. Mechanismen das Eindringen der KW im Verlaufe früher Phasen der Halokinese begründeten, wird weiter untersucht.

Computertomographische Untersuchungen an Knäuelsalzproben mit makroskopisch sichtbaren Poren ergaben relative Porositäten von bis zu 1,3 Vol.-%, während KW-freie Hauptsalzproben mittels CT bestimmte Porositäten von ca. 0,2 Vol.-% aufweisen. Die hohen Porositäten der KW-führenden Knäuelsalz-Kernabschnitte sind äußerst selten und bisher lediglich in Knäuelsalzproben mit erhöhten (bis maximal ca. 500 ppm) KW-Gehalten nachgewiesen worden. Lediglich in den Bohrkernen von 3 KW-Probenahme- bzw. Packerbohrungen (von insgesamt 60 Bohrungen) wurden makroskopisch Poren beobachtet, wobei die porösen Bereiche auf wenige cm der Kerne begrenzt sind.

Die mittels CT dreidimensional rekonstruierten Porenraumuster liefern wichtige Hinweise zu den an den Salzaufstieg gebundenen, inzwischen fragmentierten Migrationspfaden und Speicherräumen für die KW-Anreicherungen. Vermutlich handelt es sich bei den mittels CT nachgewiesenen Porenraumanteilen um früh-halokinetische, im Hauptsalz fixierte Fluidvorkommen (inklusive KW), die beim Salzaufstieg (Kriechen und Verheilen des Salzgesteins) ein Verheilen des KW-gefüllten Porenraums verhinderten. Die in den Frühphasen der Halokinese für die ursprünglich aus dem Staßfurt-Karbonat stammenden und beim Salzaufstieg mobilisierten KW bzw. Fluide (GERLING et al. 2002; HAMMER et al. 2012) vorhandenen Migrationswege sind bei der halokinetischen Deformation während

des Salzaufstiegs zerrissen und in nicht KW-führenden Bereichen wieder durch Verheilung verschlossen worden. Durch die halokinetischen Prozesse liegen die KW-führenden Porenraumanteile isoliert vor. Jedoch lassen länger andauernde und impulsartig schwankende Zutrittsraten an einigen Packerbohrungen auf einen z. T. vernetzten oder durch Druckentlastungsprozesse sich vereinigenden Porenraum schließen, da die Zutrittsmengen aus dem ansonsten sehr dichten Salzgestein zu groß sind, um sie nur auf die Auflockerungszonen der Packerbohrungen zu beziehen.

Im Berichtszeitraum wurden Aufheizversuche am Heiz-Kühl-Tisch durchgeführt, die wichtige Erkenntnisse darüber liefern, inwiefern erhöhte Temperaturen zu einer Mobilisierung der Fluidphasen führen können. Untersuchungen an Asse-Salz-Proben (bei Temperaturen von 345°C, siehe ZULAUF et al. 2010) zeigten, dass bei der Deformation von Salzgesteinen eine Mobilisierung von Fluidphasen im Mikromaßstab durch Mikrorissbildung stattfinden kann, bei der sich bevorzugt im Grenzbereich von Anhydrit zu Halit Fluidphasen umverteilen können. Die Analysen am Heiz-Kühl-Tisch-Mikroskop konnten zeigen, dass unter Normaldruck Mikrorissbildung im Anhydrit bzw. Korngrenzenaufweitung die entscheidenden Mechanismen für eine lokal sehr begrenzte Fluidumverteilung und -migration darstellen. Erhöhte Temperaturen sorgten speziell in den Anhydritkristallen aufgrund der deutlichen Wärmeausdehnung des angrenzenden Halits für eine Mikrorissentstehung bzw. -aufweitung, bevorzugt entlang der Spaltflächen, die anschließend mit Fluidphasen gefüllt wurden. Mikrorissbildung im Halit im Kontakt zu einem KW-führenden Anhydritkristall konnte im Unterschied zu den Deformationsversuchen (bei Temperaturen bis 345°C) an Asse-Salz-Proben nicht festgestellt werden. Im Halit konnte nur interkristalliner Fluidtransport, im Wesentlichen durch aufweitende Korngrenzen, beobachtet werden. Hierbei blieben die Korngrenzenfluide jedoch meist ortsfest und wurden nur von dünnen Fluidfilmen umflossen. Die bei der Aufheizung unter Normaldruck beschriebenen Phänomene fallen bei den hohen Umgebungsdrücken im Salzstock und den langsameren Aufheizraten bei Einlagerung einer Wärmequelle jedoch deutlich geringer aus, als sie am Heiz-Kühl-Tisch beobachtet wurden.

An gleichmäßig über den Q1E verteilten Hauptsalzproben wurden die Gehalte und die molekularen Zusammensetzungen der im Salzgestein vorkommenden KW bestimmt. Dazu wurden neue Methoden zur verbesserten Beprobung und Analyse von KW in Kernproben aus eigens dafür gestoßenen, 6,0 m bzw. 9,0 m langen Probenahme-Kurzbohrungen entwickelt. Die Gehalte an KW variieren zwischen den Bohrungen und innerhalb der Bohrungen stark und reichen von 0,01 bis 121 mg/kg Salzgestein. KW-Konzentrationen von mehr als 10 mg/kg Gestein wurden lediglich in zwei Proben aus einer der 20 KW-Probenahme-Kurzbohrungen nachgewiesen.

Vor dem Hintergrund der bisher durchgeführten Arbeiten handelt es sich bei den nachgewiesenen KW überwiegend nicht um einen primären Bestandteil des Hauptsalzes. Die KW stellen nachträglich und vermutlich entlang von halokinetischen Scher- und Bewegungsbahnen bzw. temporär offenen Rissen in das halitische Salzgestein eingedrungene gasförmige und flüssige KW-Gemische dar. Durch die an den Salzaufstieg gebundene Deformation wurden die KW aus dem Liegenden bzw. aus den liegenden Partien der Zechstein-Formation mobilisiert. Die durch thermokatalytische Prozesse gebildeten gasförmigen und flüssigen KW stiegen entlang von beim Salzaufstieg gebildeten, temporär offenen Scherzonen bzw. Bewegungsbahnen in das Hauptsalz auf, wo sie zusammen mit den primären Restlösungen an die Korngrenzen von Halitkristallen und in die anhydritreicheren Partien verdrängt bzw. in den Kluftspeichern der Anhydritlagen gespeichert wurden. Die Mobilisation der KW, induziert durch deviatorische Spannungen bzw. Deformationsprozesse, erfolgte vermutlich immer zusammen mit salinärer Restlösung entlang von Korngrenzen sowie temporär offenen Rissen durch das Salzgestein.

Die Untersuchungsergebnisse repräsentieren einen Zwischenstand der Arbeiten.

Literaturverzeichnis

- ALKAN, H. (2009): Percolation model for dilatancy-induced permeability of the excavation damaged zone in rock salt. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46, 716-724.
- AMELUNG, P. & SCHUBERT, J. (2000): Dokumentation der Kondensatvorkommen im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (Arbeitspaket 9G4413000). – 30 S., 1 Anlage, Peine (DBE).
- BESTMANN, M., PIAZOLO, S., SPIERS, C. J. & PRIOR, D. J. (2005): Microstructural evolution during initial stages of static recovery and recrystallization: new insights from in-situ heating experiments combined with electron backscatter diffraction analysis. *J. Struct. Geol.* 27, 447-457.
- BfS (2002): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). 1. Fortschreibung: Datenerfassung bis 30.09.2000. - unveröffentl. Ber.: Bundesamt für Strahlenschutz. 1183 S., 47 Abb., 16 Tab., 4 Anl.; Salzgitter.
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J., FISCHBECK, R., HAMMER, J., JARITZ, W., KELLER, S., MINGERZAHN, G., SCHRAMM, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben, Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. *Geologisches Jahrbuch C73*, 5–211. Hannover.
- BURLIGA, S. & CZECHOWSKI, F. (2010): Anatomy of hydrocarbon-bearing zones, hydrocarbon provenance and their contribution to brittle fracturing of rock salt in the Klodawa Salt Structure (central Poland). SMRI Spring 2010 Technical Conference, Grand Junction, USA.
- CARTER, N. L., HORSEMAN, S. T., RUSSELL, J. E. & HANDIN, J. (1993): Rheology of rocksalt. *J. Struct. Geol.* 15, 1257–1271.
- DE LAS CUEVAS, C. (1997): Pore structure characterization in rock salt. *Engin. Geol.* 47, 17-30.
- DESBOIS, G., ZAVADA, P., SCHLÉDER, Z. & URAI, J. L. (2010): Deformation and recrystallization mechanisms in naturally deformed salt fountain: microstructural evidence for a switch in deformation mechanisms with increased availability of meteoric water and decreased grain size (Qum Kuh, central Iran). *J. Struct. Geol.* 32, 580-594.

- FRANSSEN, R.C.M.W. (1993): Rheology of synthetic rock salt with emphasis on the influence of deformation history and geometry on the flow behavior. PhD thesis, Rijksuniversiteit Utrecht.
- FRANSSEN, R.C.M.W. (1994): The rheology of synthetic rocksalt in uniaxial compression. *Tectonophysics* 233, 1–40.
- GERLING, P., BEER, W. & BORNEMANN, O. (1991): Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. *Kali und Steinsalz* 10, 376-383.
- GERLING, P., FABER, E. & WEHNER, H. (2002): Interpretation der chemischen Analysen von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen, BGR-Bericht, Tagebuch-Nr. 12243/02, 82 S.
- GERLING, P. & FABER, E. (2001): Dokumentation der chemischen Analysen von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen. BGR-Bericht, Hannover, Tagebuch-Nr. 10717/01, 20 S.
- HÄGER, A. & OSTERTAG-HENNING, C. (2012a): Kontamination von Bohrkernen und Bohrerät mit Schmiermitteln und Maßnahmen zur Behebung der Kontamination. BGR-Bericht, Hannover, 19 S.
- HÄGER, A. & OSTERTAG-HENNING, C. (2012b): Chemische Reaktionen bei Aufheizexperimenten mit Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Salzen. *Schriftenreihe Dtsch. Ges. Geowiss.*, 80, S. 365, Votr. GeoHannover 2012.
- HAMMER, J., PUSCH, M., HÄGER, A., OSTERTAG-HENNING, C., SCHLÖMER, S., MINGERZAHN, G., SCHEEDER, G., SHAO, H., PAUL, B., SCHULZE, O., ZARETZKI, B. & HESSER, J. (2012): Projekt Gorleben. Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben - Zwischenbericht 2011. Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 236 S., 107 Abb., 17 Tab., 3 Anhänge.
- MEES, F., SWENNEN, R., VAN GEET, M. & JACOBS, P. (2003): Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences. Geological Society, London, Special Publications, 215, 1-6.
- PASSCHIER, C. W. & TROUW, R. A. J. (2005): *Microtectonics*, 366 pp. Springer, Berlin.
- PAUL, B., HESSER, J., KUNZ, H., FLENTJE, R., NOWOTNY, D. & SANCHEZ-HERRERO, S. (2012): Geotechnische Instrumentierung und Messungen der BGR. Zwischenbericht 2011, (Arbeitspaket 9GE331100000). BGR, Hannover, in Vorbereitung.

- PAUL, B., HESSER, J., NOWOTNY, D., HOFFMANN, S. & SANCHEZ-HERRERO, S. (2013): Geotechnische Instrumentierung und Messungen der BGR Stand 2012 - Zwischenbericht (AP 9GE331100000). BGR, Hannover, in Vorbereitung.
- PEACH, C. J., SPIERS, C. J. & TRIMBY, P. W. (2001): Effect of confining pressure on dilation, recrystallization, and flow of rock salt at 150°C. *J. Geophys. Res.* 106, 13315-13328.
- PENNOCK, G. M., DRURY, M. R., TRIMBY, P. W. & SPIERS, C. J. (2002): Misorientation distributions in hot NaCl using electron backscattered diffraction. *J. Microsc.* 205, 285-294.
- POPP, T., MINKLEY, W., SALZER, K. & SCHULZE, O. (2012): Gas transport properties of rock salt – synoptic view. In: BÉREST, P., GHOREYCHI, M., HADJ-HASSEN, F., TIJANI, M. (Eds.): *The Mechanical Behavior of Salt VII*. Taylor & Francis Group, London, 143-154.
- POPP, T., SALZER, K., WIEDEMANN, M., KANSY, A. & PUSCH, G. (2007): Gas transport in dry rock salt – implications from laboratory investigations and field studies. In: WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY, W., HARDY JR., H.R. (Eds.), *The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt*. Taylor & Francis Group, London, 17-26.
- POPP, T., FISCHER, M. & KERN, H. (2002): Gefügekundliche Untersuchungen zur Verteilung von Kohlenwasserstoffen (KW) in Steinsalz.- *Meyniana*, 54: 131 - 154.
- ROTHWELL, R. G. & RACK, F. R. (2006): New techniques in sediment core analysis: an introduction. *Geol. Soc., London, Spec. Pub.* 267, 1-29.
- ROEDDER, E. (1984): The fluids in salt. *Am. Min.* 69, 413-439.
- SCHLÉDER, Z. & URAI, J.L. (2005): Microstructural evolution of deformation-modified primary halite from the middle triassic Röt Formation at Hengelo, The Netherlands. *Int. J. Earth Sci.* 94, 941–955.
- SCHOENHERR, J., URAI, J. L., KUKLA, P.A., LITKE, R., SCHLÉDER, Z., LARROQUE, J.-M., NEWALL, M. J., AL-ABRY, N., AL-SIYABI, H. A. & RAWAHI, Z. (2007): Limits to the sealing capacity of rock salt: A case study of the infra-Cambrian Ara Salt from the South Oman salt basin. *AAPG Bulletin* 91/11, 1541-1557.

- SCHULZE, O. (2007): Investigations on damage and healing of rock salt. In: WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY, W., HARDY JR., H.R. (Eds.): The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt. Taylor & Francis Group, London, 33-44.
- SCHULZE, O., POPP, T. & KERN, H. (2001): Development of damage and permeability in deforming rock salt. *Engin. Geol.* 61, 163-180.
- STORMONT, J. C. (1997): Conduct and interpretation of gas permeability measurements in rock salt. *Int. J. Rock Mech & Min. Sci.* 34:3-4, paper No. 303.
- STORMONT, J. C. & DAEMEN, J. J. K. (1992): Laboratory Study of Gas Permeability Changes in Rock Salt During Deformation. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.* 29, 325-342.
- STORMONT, J. C. & DAEMEN, J. J. K. (1997): Argon gas permeability of New Mexico rock salt under hydrostatic compression. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.* 17, 281-288.
- TWISS, R.J. & MOORES, E.M. (1992): *Structural Geology*, 532 pp. W.H. Freeman & Co, New York.
- URAI, J.L. & SPIERS, C.J. (2007): The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and the rheology of rocksalt during long-term deformation. In: WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY, W. & HARDY JR., H.R. (Eds.): The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt. Taylor & Francis Group, London, 149–158.
- URAI, J.L., SPIERS, C.J., PEACH, C.J., FRANSSSEN, R.C.M.W. & LIEZENBERG, J.L. (1987): Deformation mechanisms operating in naturally deformed halite rocks as deduced from microstructural investigations. *Geol. Mijnbouw* 66, 165–176.
- WEBER, J. R., HAMMER, J. & SCHULZE, O. (2011): Projekt Gorleben. Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 28 S.
- ZARETZKI, B., SHAO, H. & HESSER, J. (2012): Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche: Permeabilitätsmessungen - Stand 2011 - Ergebnisbericht (AP 9GE431100000). 123 S., 46 Abb., 8 Tab., 2 Anhänge, Hannover (BGR).

ZULAUF, G., ZULAUF, J., BORNEMANN, O., BRENKER, F. E., HÖFER, H. E., PEINL, M. & WOODLAND, A. B. (2010): Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 2: Deformation mechanisms and the role of fluids. J. Struct. Geol. 32, 264-277.

ZULAUF, G., ZULAUF, J., BORNEMANN, O., KIHM, N., PEINL, M. & ZANELLA, F. (2009): Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction. Part 1: Geometric and kinematic aspects. J. Struct. Geol. 31, 460-474.

Abkürzungsverzeichnis

BES	Rückstreuelektronenbild
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
BG	Bestimmungsgrenze
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CLSM	Confocal Laser Scanning Microscopy
CT	Computertomographie
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH, Peine
EB1	Erkundungsbereich 1
EBSD	Electron backscatter diffraction
EBSP	Electron backscatter patterns
EDX	energiedispersives Röntgenfluoreszenz-Detektorsystem
ESEM	Environmental Scanning Electron Microscope
FID	Flammenionisationsdetektor
GC	Gaschromatograph
HF	Hellfeld
KW	Kohlenwasserstoffe
i.d.R.	in der Regel
LAS AF	Leica Application Suite Advanced Fluorescence
LIMS	Laborinformations- und Managementsystem

n.n.	nicht nachweisbar
NE	Nordost
NG	Nachweisgrenze
Q1E	Querschlag 1 Ost
Q1W	Querschlag 1 West
RB	Richtbohrung
REM	Rasterelektronenmikroskop
RF	Zutrittsstelle
S/N	Signal-Rauschen-Verhältnisses
SGR	subgrain rotation
SSE	Südsüdost
SW	Südwest
UV	Ultraviolett
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
X-Pol	gekreuzte Polarisatoren
z2	Stoßfurt-Folge
z2HS	Hauptsalz, Stoßfurt-Folge
z2HS1	Knäuelsalz, Hauptsalz, Stoßfurt-Folge
z2HS2	Streifensalz, Hauptsalz, Stoßfurt-Folge
z2HS3	Kristallbrockensalz, Hauptsalz, Stoßfurt-Folge

Einheiten

°C	Grad Celsius
°	Grad
µm	Mikrometer
‰	Promille
%	Prozent
bar	Bar
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratzentimeter
d	delta
dpi	dots per inch
exp	Exponent
g	Gramm
g/Tag	Gramm pro Tag
Gew.-%	Gewichtsprozent
gon	Gon
hPa	Hektopascal
J	Joule
K	Kelvin
km	Kilometer
kV	Kilovolt
m	Meter

m ²	Quadratmeter
mbar	Millibar
mg/kg	Milligramm pro Kilogramm
ml	Milliliter
mm	Millimeter
m ³	Kubikmeter
mm ³	Kubikmillimeter
mol	Mol
MPa	Megapascal
ng/g	nanogramm pro Gramm
nm	Nanometer
ppb	parts per billion (10 ⁻⁷ Prozent)
ppm	parts per million (10 ⁻⁴ Prozent)
R ²	Korrelation
s	Sekunde
stdl	Liter unter Normalbedingungen
Vol.-%	Volumenprozent

Formelzeichen

D Subkorndurchmesser

A Materialkonstante

$\dot{\epsilon}$ Strainrate

L Kernlänge des KW-imprägnierten Bereiches

n Anzahl

Q Aktivierungsenergie

R Gaskonstante

r Bohrungsradius

T Temperatur

V Gebirgsvolumen

λ Wellenlänge

π Pi

σ' Differentialspannung

Chemische Verbindungen

C ₁	Methan
C ₁₄	Tetradecan
C ₁₆	Hexadecan
C ₁₈	Octadecan
C ₂	Ethan
C ₃	Propan
C ₃₀	Triacontan
C ₃₅	Pentatriacontan
C ₄₀	Tetracontan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
NaCl	Natriumchlorid

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Paläopiezometrische Daten von Hauptsalzproben aus dem Q1W (Knäuelsalz, z2HS1 – blau; Streifensalz, z2HS2 – violett; Std.-Abw. - Standardabweichung).....	41
Tab. 2: Scanparameter, räumliche Dimensionen der gescannten Probenvolumina und ermittelte Porositätswerte der bisher untersuchten Knäuelsalzproben..	62
Tab. 3: Anregungswellenlängen (AOTF), Detektionsbereiche und farbliche Codierung der CLSM-Aufnahmen in Bezug auf die für die Analyse verwendeten Laser.....	73
Tab. 4: Bestimmungsgrenzen der flüchtigen KW Methan bis Hexan.....	85
Tab. 5: Methoden-Kenndaten für die Messserien im Q1W (2011) und Q1E (2012) im Vergleich. (NG – Nachweisgrenze, BG – Bestimmungsgrenze).....	86
Tab. 6: Darstellung der Probenpositionen im Beprobungsfeld 2A und der KW-Gehalte, ermittelt über die sequentielle Extraktion (Extraktionsschritte I bis IV siehe Text). „n.n.“ = nicht nachgewiesen (< 0,25 mg/kg).....	100
Tab. 7: Darstellung der Untersuchungsergebnisse zu den KW-Gehalten C_1 - C_{40} in den Proben aus den Beprobungsfeldern 6A und 1/C2 (Bohrort 5.0).....	104
Tab. 8: Lage und Stratigraphie aller in den Jahren 2011 und 2012 installierten KW-Packerbohrungen im EB1.....	116
Tab. 9: Notwendige Daten für die Volumen- und Radiusberechnung.....	125

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Als „gesprenkelt“ eingestuftes Probenkörper RB681-003 (Teufe 1,51 m bis 1,63 m, Bohrkern Durchmesser ca. 80 mm) unter UV-Strahlung (links) und im Auflicht (rechts).....	13
Abb. 2: Kernsegment aus der Bohrung RB669 (Teufe 8,30 m bis 8,44 m) mit gelblich-oranger Eigenfluoreszenz. An den Korngrenzen der Halitkristalle sind zahlreiche kleine gelblich-orange Fluoreszenzzentren zu erkennen. Die Aufnahme wurde unter Verwendung des Programms Photoshop aufgehellt und der Kontrast reduziert, um die auf dem Originalphoto schwer zu erfassende Eigenfluoreszenz zu verstärken.....	15
Abb. 3: Streifenartige Bereiche gelblich- bis orangefarbener Fluoreszenz am Weststoß des Q1W auf der 840 m-Sohle im Erkundungsbergwerk Gorleben. Bereichsweise treten lokal begrenzt KW (erkennbar an der weißlich-bläulichen Fluoreszenz) aus dem Gebirge aus und verteilen sich großflächig über Stoß und Firste. Dabei wird durch das schwerkraftgetriebene Herunterlaufen der KW am Stoß ein scheinbar großflächiges KW-Vorkommen suggeriert (Aufnahme: DBE).....	16
Abb. 4: Kernsegment aus der Bohrung RB669 (Teufe 7,50 m bis 7,66 m) mit interkristallinen KW und bereichsweise ausgeprägtem Halo-Effekt. Die Bohrung RB669 stellt die einzige Kurzbohrung im Q1E dar, in der größere KW-impregniertere Bereiche beobachtet wurden.....	17
Abb. 5: UV- (oben) und Kunstlichtaufnahme (unten) des Oststoßes des Q1W im Bereich des großen Kondensatflecks im Umfeld der Bohrung RB648. Die Aufnahmen aus dem Jahr 2012 verdeutlichen, dass es sich bei dem großen Kondensatfleck nicht um einen einzelnen großen Zutritt handelt, sondern vielmehr um zahlreiche kleine, die einen scheinbar großflächigen Zutritt suggerieren (Aufnahmen: DBE).....	19
Abb. 6: Streckenkreuz der Bohrorte 3.1 und 4.0 mit dem Q1E im Zentralbereich des Hauptsattels im Salzstock Gorleben. Einzig die KW-Bohrung RB669 sowie die Packerbohrungen RB695, RB696 und RB697 zeigten unter UV-Licht (254 nm) Bereiche mit KW-Fluoreszenz. Die Kerne aller übrigen Bohrungen weisen keine UV-Fluoreszenz auf.....	21
Abb. 7: UV-Aufnahme von halokinetisch entstandenen, partiell KW-führenden, inzwischen wieder verheilten Scher- und/oder Bewegungsbahnen im Q1W im Bereich der KW-Bohrung RB645 (rechts unten im Bild ist das Manometer zur Druckmessung in der Bohrung sichtbar). Die Ausdehnung der Kondensatflecken ist z. T. sekundären Ursprungs und das Resultat der sich in Folge der Auflockerung und Beraubung auf der Oberfläche verteilenden KW (Aufnahme DBE). Bildbreite ca. 5 m, Bildhöhe ca. 3 m.....	22

Abb. 8:	UV-Aufnahme im Q1W (Blickrichtung von SSE). Die KW erscheinen im Q1W als gelblichweiße Kondensatfahnen, die sich, ausgehend von einigen, wenige cm-breiten, bläulichweißen Schlieren (vgl. Abb. 5, 7 und 9) infolge von Beraubearbeiten und daran gebundenen Verschmierungen sowie durch die Schwerkraft großflächig am Stoß und an der Firste verteilen. Die KW-Belastung im Q1W erscheint in Folge dessen deutlich größer und suggeriert ein scheinbar großflächiges KW-Vorkommen (Aufnahme DBE).....	23
Abb. 9:	Kombinationsaufnahme „Kunstlicht und UV-Strahlung“ aus den Stoß-Aufnahmen im Bohrort 1.2 (Höhe des Zutritts RF187 unten rechts ca. 1 m; Aufnahme: DBE). Die UV-aktiven KW sind lagig, meist der Schichtung folgend, in dünnmächtigen Anhydritschichten oder anhydritreichen Halitschichten des z2HS2 angeordnet, die beim Salzaufstieg verfaltet wurden. Bereichsweise treten die KW in Folge der Auflockerung des Gebirges durch die Bohrortaufahrung aus und verteilen sich großflächig als Kondensatflecken und -fahnen am Stoß, wodurch ein scheinbar großflächiges Vorkommen suggeriert wird.....	24
Abb. 10:	Kombinationsaufnahme „Durchlicht und UV-Strahlung“ für einen Probenkörper aus dem Streifensalz (RB773-001 bei Teufe 0,70 m bis 0,94 m). Die lagenartig ausgebildeten, UV-aktiven Bereiche befinden sich innerhalb des betrachteten Kernsegmentes ausschließlich an den Korngrenzen klarer, rekristallisierter Halitkristalle.....	24
Abb. 11:	A) Fluideinschlüsse an den Korngrenzen der Halitkristalle (links unten) und auf der Oberfläche von an den Korngrenzen gelegenen Anhydrit (links), sowie fluid-gefüllte Risse (mittig) im Halit (RB669, Teufe 7,31 m bis 7,36 m, Hellfeld)..... B) Sekundäre, vermutlich dendritisch verästelte Fluideinschlüsse an den Korngrenzen der Halitkristalle (links) neben verheilten und von würfelförmigen Fluideinschlüssen nachgezeichneten, sekundären Rissen (mittig) entlang der Spaltflächen des Halitkristalls (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, Hellfeld)..... C) Nahaufnahme sekundärer, würfelförmiger Fluideinschlüsse, teilweise mit Gasblase (rote Pfeile) entlang verheilten Risse/Spaltflächen im Halit (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, Hellfeld).....	26
Abb. 12:	Mit Halit gefüllter Hohlraum innerhalb eines mindestens 5,5 cm * 2,5 cm großen, verfalteten Anhydritknäuels. Die benachbarten Anhydritkristalle sind eingeregelt, randlich alteriert und weisen Anzeichen von Drucklösung auf (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, x-Pol).....	27
Abb. 13:	Mit Halit gefüllter Hohlraum entlang eines Faltenschenkels innerhalb eines Anhydritknäuels. Große idiomorphe Anhydritkristalle säumen die Faltenschenkel der ehemaligen Anhydritlage (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, x-Pol).....	28

Abb. 14:	A) Stängelige Anhydritkristalle mit spaltflächenparallelen Kapillaren. Die Kristalle zeigen teilweise randliche Alterationssäume und sind mit idiomorphen Pyritkristallen (Bildmitte) bzw. Dolomit (unterer Kristall) verwachsen (RB669, Teufe 7,31 m bis 7,36 m, Hellfeld).....	28
	B) Stängelige bis tafelige Anhydritkristalle mit spaltflächenparallelen Kapillaren und anhaftenden Fluidmenisken (RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, Hellfeld, Stack-Aufnahme über 16 µm).....	28
Abb. 15:	A) Pastellfarbener idiomorpher Karbonat-/Dolomitkristall, verwachsen mit stängeligem, an den Endflächen leicht alterierten Anhydrit mit bläulich-rötlichen Interferenzfarben (RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, X-Pol).....	30
	B) Idiomorpher Karbonat-/Dolomitkristall mit Anwachs säumen (Phantomkristallen). Die einzelnen Karbonat-Wachstumszyklen weisen auf eine mehrfache Veränderung der Bildungsbedingungen des Kristalls hin, ehe dieser mit den im Schliff sichtbaren Anhydritkristallen verwachsen ist (RB672, Teufe 8,35 m bis 8,41 m, X-Pol).....	30
	C) Hypidio- bis xenomorpher Karbonat-/Dolomitkristall mit deutlich sichtbaren tonig-organischen Verunreinigungen, verwachsen mit z. T. stark alterierten Anhydritkristallen (RB672, Teufe 8,35 m bis 8,41 m, X-Pol).....	30
	D) Anhydritknäuel aus körnigen, alterierten Anhydritkristallen mit kleinen, haliterfüllten Hohlräumen und eingeschlossenen, idiomorphen Karbonat-/Dolomitkristallen (Pfeile) in halitischer Matrix (RB669, Teufe 7,31 m bis 7,36 m, X-Pol).....	30
	E) Hypidio- bis idiomorphe Karbonat-/Dolomitkristalle (Pfeile) säumen einen Teil eines mit Halit gefüllten Hohlraums innerhalb eines Anhydritknäuels aus randlich alterierten, körnigen Anhydritkristallen (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, X-Pol).....	30
	F) Hypidio- bis xenomorphe Karbonat-/Dolomitkristalle (Pfeile), vollständig verwachsen mit körnigen, randlich alterierten Anhydritkristallen (Anhydritknäuel). Bereichsweise sind tonig-organische Schlieren in den Kornzwickeln der Anhydritkristalle zu erkennen (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, X-Pol).	30
Abb. 16:	A) Pyritaggregat aus zwei ca. 20 µm bis 30 µm durchmessenden, idiomorphen Pyritkristallen (Pentagondodekaeder) isoliert in halitischer Matrix (RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, Hellfeld).....	31
	B) Mehrere kleine idiomorphe bis teilweise verzerrte Pyritkristalle (Pentagondodekaeder) bis ca. 30 µm Durchmesser und ein hypidiomorpher Pyritkristall bis ca. 100 µm Durchmesser im Randbereich eines Anhydritknäuels aus randlich alterierten, Anzeichen von Drucklösung und Spaltflächen aufweisenden Anhydritkristallen (RB682, Teufe 2,23 m bis 2,28 m, Hellfeld).....	31
	C) Verwachsene Anhydritkristalle mit randlichen, spaltflächenparallelen Kapillaren in halitischer Matrix. Der untere Kristall umschließt einen 10 µm bis 20 µm durchmessenden, idiomorphen Pyritkristall (Pentagondodekaeder; RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, Hellfeld).....	31
	D) Idiomorpher Anhydritkristall mit spaltflächenparallelen Kapillaren in halitischer Matrix. Auf dem Anhydritkristall ist ein ca. 20 µm durchmessender, verzerrter Pentagondodekaeder bis Kuboktaeder (schwarz) zu erkennen (RB681, Teufe 1,56 m bis 1,61 m, Hellfeld).....	31

Abb. 17:	Kernsegment aus der Bohrung RB648 (Teufe 0,50 m bis 0,76 m) im Durchlicht (oben) und als Kombinationsaufnahme (unten) Durchlicht/UV-Strahlung (254 nm). Anhydritreiche Partien erscheinen schwarz, während weitgehend anhydritfreie Partien transparent bis grau erscheinen. Die im Kernsegment enthaltenen Korngrenzen-KW (cyan) sind im vorliegenden Kernsegment überwiegend an die anhydritreichen Zonen des Bohrkerns gebunden.	33
Abb. 18:	Invers proportionale Abhängigkeit der Subkorngröße in Halit von der Differentialspannung (aus: SCHLÉDER & URAI 2005).	36
Abb. 19:	Lokationen der zur Bestimmung der Paläodifferentialspannungen ausgewählten Bohrkerne im Knäuel- (blaue Kreise) und Streifensalz (violette Kreise) entlang von Q1W (HAMMER et al. 2012).	37
Abb. 20:	Charakteristische Subkorngefüge der untersuchten Knäuel- und Streifensalzproben aus dem Q1W. Alle Aufnahmen unter parallelen Nicols, A) bis E) im Durchlicht, Aufnahme F) bei Auflicht (Photos: N. Thiemeyer).	39
	A) Klassisches Subkorngefüge mit relativ einheitlichen Korngrößen; Probe: RB650.018_2b.	39
	B) Subkörner mit deutlich ausgeprägten Kanten, die einer leichten Vorzugsorientierung folgen (siehe Pfeil); Probe: RB662.019_2b.	39
	C) Entlang einer Suturen formen sich kleine Subkörner (siehe Pfeil), die eine bimodale Größenverteilung zur Folge haben; Probe: RB658.013_2s.	39
	D) Innerhalb einiger Subkörner kommen substrukturelle Deformationsspuren (eventuell slip lines) vor (siehe Pfeil); Probe: RB652.015.	39
	E) Benachbarte Halitkristalle mit unterschiedlich ausgeprägtem Subkorngefüge, bedingt durch statische Rekristallisation oder unterschiedliche Kristallorientierung; Probe: RB686.005.	39
	F) Subkorngefüge im Umfeld von Anhydriteinschlüssen. Die Subkörner sind deutlich kleiner und zur Paläopiezometrie nicht zu verwenden; Probe: RB686.005.	39
Abb. 21:	Die mittleren Paläodifferentialspannungen der Knäuelsalzproben (z2HS1, blau) stimmen bis auf einen Ausreißer gut überein. Bei den drei Proben aus dem Streifensalz (z2HS2, violett) deutet sich eine Tendenz zu leicht höheren Werten an.	42
Abb. 22:	Prinzip der Subkornrotations-Rekristallisation (PASSCHIER & TROUW 2005). Die Linien innerhalb der Kristalle bilden die Kristallgitterorientierung ab. Subkorngrößen entwickeln sich durch Rotation der Subkörner zu Großwinkelkorngrenzen.	44
Abb. 23:	Die REM-Aufnahme (Rückstreuungselektronenbild, BES) der Probe RB655.016_2 zeigt eine präparationsbedingt stark deformierte Oberfläche des Halitkristalls. EBSD-Aufnahmen können deshalb nur an geätzten Salzschliffen durchgeführt werden. Die dunkle Struktur (Bildmitte) zeigt einen Fluideinschluss entlang einer Korngrenze (Photo: N. Thiemeyer).	44
Abb. 24:	Deutlich ausgebildetes Subkorngefüge in der Probe RB662.019_2b. Der weiße Rahmen entspricht dem Ausschnitt der EBSD-Map in Abb. 25. Aufnahme unter Auflicht (Photo: N. Thiemeyer).	46

Abb. 25:	EBSD-Map der Probe RB662.019_2b. Die unterschiedlichen Farben zeigen die Orientierungen der einzelnen Halitkristalle zueinander. Innerhalb des größten Kristalls (grün) sind nur sehr wenige Subkorn Grenzen (weiß) aufgrund von geringer Kornrotation erfasst worden. Die rotierten Subkörner sind nur um etwa 2° gegeneinander verkippt (siehe Sprünge im Missorientierungshistogramm). Über das Profil A-B lässt sich eine Biegung des Halitkristalls von knapp 6° erkennen.....	47
Abb. 26:	A) EBSD-Map aus vier Einzelmessungen innerhalb eines Halitgroßkristalls der Probe RB655.009_s. Es ist eine Rotation einzelner Subkörner von bis zu > 10° erkennbar (schwarze Grenze, Bildmitte). Die grauen Bereiche stellen Messpunkte ohne Ergebnis dar..... B) Anordnung der EBSD-Map innerhalb des Halitgroßkristalls im Dickschliff.....	48 48
Abb. 27:	EBSD-Map der Probe RB658.013_2s. Die beiden Halitkristalle zeigen eine unterschiedliche Anzahl an kleinen Missorientierungen sowie unterschiedliche Biegungscharakteristika ihrer Kristallgitter. Profil A-B zeigt eine stetige, gerichtete Biegung, Profil C-D hingegen in der Richtung variierende und stärker entwickelte Verkipnungen der Gitterstruktur.....	49
Abb. 28:	A) Die EBSD-Map für die Probe RB659.015_1s ist durch ein deutlich rotiertes (ehemaliges) Subkorn charakterisiert, das mit bis zu 28° gegenüber seiner Umgebung rotiert ist (siehe Profil C-D). Die restlichen Rotationswinkel der Subkörner schwanken zwischen 2-3°..... B) Der Polfiguren-Plot visualisiert das stark rotierte Korn neben den anderen Halitkristallen in seiner Raumlage. Das Streuen der blauen Datenpunkte verdeutlicht die klare Verbiegung des Halitkorns um bis zu mehr als 10°..... C) Der Punktdichte-Plot der EBSD-Messung stellt abhängig von der Datenpunktverteilung die Orientierungsschwerpunkte dar. Das rotierte Korn ist hier ebenfalls erkennbar.....	50 50 50
Abb. 29:	Ausschnitt aus der in Abb. 28 dargestellten EBSD-Map für die Probe RB659.015_1s mit Profil C-D. Die Kornformen stimmen verzerrungsbedingt nicht exakt mit jenen der EBSD-Map überein. Das stärker rotierte Korn (grüne Umrahmung) hebt sich optisch nicht vom restlichen Subkornverband ab. Die Korngrenze zeigt ebenfalls keine auffälligen Merkmale. Für Großwinkelkorngrenzen typische Fluiddekorationen fehlen (Photo: N. Thiemeyer).....	51
Abb. 30:	Kernabschnitt aus der Packerbohrung RB686 mit einem Kerndurchmesser von 28 mm. Die an der Außenseite des Kerns erkennbaren Poren (Pfeile) können mit Kondensat-Rückständen ausgekleidet sein.....	53
Abb. 31:	Rohdatensatz eines CT-Scans (links) mit manuell, unter Nutzung von VGStudio extrahierten Porenvolumina (rechts) (Photos: N. Thiemeyer).....	55
Abb. 32:	Originaler (links) und mittels ImageJ ausgewerteter Rohdatensatz (rechts) mit automatisierter Auswahl von Porenraum über ein definiertes Graustufenintervall (Photos: N. Thiemeyer).....	56

Abb. 33:	Porenraumverteilung in der dreidimensionalen Rekonstruktion bei 0° (obere Reihe) und 90° (mittlere Reihe). Die <i>sum-along</i> -Projektion (c, f und i) veranschaulicht die Mengenverteilung der Poren durch hellere (viel Volumen) und dunklere Partien (wenig Volumen). Die Dimension der Probe RB686.005_CT entspricht in etwa der räumlichen Skala von RB685.004_CT (Photos: N. Thiemeyer).....	58
Abb. 34:	Einzelne Porenvolumina im 3D-Datensatz der Probe RB687.005_CT können miteinander verbunden sein (Pfeile) (Photos: N. Thiemeyer).....	60
Abb. 35:	Porenverteilung in der Probe RB657.005_CT in der dreidimensionalen Rekonstruktion. Der Porenraumanteil ist gering und limitiert auf eine dünne, penetrative Struktur im Zentrum des Probenkörpers (Photos: N. Thiemeyer).....	61
Abb. 36:	Problematik der Extraktion diffuser Fluidvorkommen oder Porenräume mit <i>VGStudio</i> . A: Intakte Korngrenzen sind für das menschliche Auge noch zu erkennen, verschwimmen jedoch bei starker Vergrößerung im Datensatz (B und C). Eine Extraktion dieser Speicherräume oder potenzieller Migrationswege ist beim <i>ImageJ</i> -Verfahren automatisiert und manuell nicht durchführbar (Photos: N. Thiemeyer).....	63
Abb. 37:	<i>Sum-along</i> -Projektion von RB687.005_CT bei 0° (links) und 90° (rechts). Eine der Foliation folgende Verteilung des Porenraumes ist nur untergeordnet zu erkennen. Die größten Mengen an Porenvolumen sind isolierte tropfenförmige und gerundete Poren (Photos: N. Thiemeyer).....	65
Abb. 38:	Dickschliff der Probe RB686.005_CT im Durchlicht mit parallelen Nicols. Nur geringe Teile des Porenraumes werden durch blaues, infiltriertes Harz sichtbar (Photo: N. Thiemeyer).....	67
Abb. 39:	Verschiedene Porosität-Ausbildungsformen im Dickschliff der Probe RB686.005_CT (Photos: N. Thiemeyer).....	68
	A) Anhydritcluster im Durchlicht. Die Porosität wird durch das bläulich-schimmernde Harz sichtbar.....	68
	B) Halitkorngrenze im Auflicht. Links sind isolierte Volumina zu erkennen, rechts formen sie wellige und breitere Strukturen.....	68
	C) Geätzter Schliff im Durchlicht. Große Pore entlang von Halitkorngrenze.....	68
	D) Geätzter Schliff im Durchlicht. Links ist Porenraum im Triplepunkt von Halitkörnern zu erkennen, rechts pflanzt sich der Porenraum entlang der Halitkorngrenze fort. Das blaue Harz deutet den Verlauf des Porenraumes mit der Tiefe an.....	68
Abb. 40:	A) Kontaktbereich von Salzgestein (oben, weißlich) zu mit Harz verfülltem Porenraum (unten, bläulich) im Durchlicht (Probe RB686.005_CT). Der Grenzflächenverlauf ist rot-gestrichelt und verläuft gerundet. In den Korngrenzenbereichen läuft der Eintrittsbereich des Harzes spitz zu (Pfeile; Photos: N. Thiemeyer).....	69
	B) gleicher Bildausschnitt wie A) jedoch unter Auflicht und geätzt. Die scheinbar in den Porenraum gewachsenen Halitkörner zeigen Subkorngrenzen (Pfeile), was kristallplastische Deformation belegt (Photos: N. Thiemeyer).....	69

Abb. 41:	Der dreidimensionale Datensatz (RB685.004_CT) erlaubt eine detaillierte Betrachtung auch einzelner Teilbereiche und Volumina auf verschiedenen räumlichen Skalen bis an die Auflösungsgrenzen der CT-Aufnahme. Die Methode lässt es zu, kleinste Formen in gewünschtem Blickwinkel zu betrachten (Photos: N. Thiemeyer).....	72
Abb. 42:	Stack-Aufnahme von CLSM-Analysen einer KW-besetzten Korngrenze (Halit-Halit) im Knäuelsalz der Bohrung RB652 (Teufe 2,43 m bis 2,49 m; Farbcodierung vgl. Tab. 3). Die KW an den Korngrenzen der Halitkristalle weisen in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung ein unterschiedliches Fluoreszenzverhalten auf, welches sich auch in der kombinierten Aufnahme aller Laser (unten rechts) wiederfindet. Bildgröße: 246,03 µm x 246,03 µm; Z-Eindringtiefe: 80,99 µm.....	75
Abb. 43:	Kombinierte Stack-Aufnahme von CLSM-Analysen eines KW-besetzten Anhydritclusters aus dem Knäuelsalz der Bohrung RB652 (Teufe 2,43 m bis 2,49 m; Lasertyp und Farbcodierung vgl. Tab. 3) mit allen drei Lasern. Unterschiedlich zusammengesetzte KW sind in Form von an der Oberfläche der Anhydritkristalle anhaftenden Menisken, linear auf Spaltflächen oder pseudo-intrakristallin in Kapillaren (Pfeil) zu beobachten, wobei die Kapillaren unterschiedliche KW-Füllungen sowie mehrere Fluid-Phasen aufweisen können. Bildgröße: 246,03 µm x 246,03 µm; Z-Eindringtiefe: 30,21 µm.....	76
Abb. 44:	Stack-Aufnahmen von CLSM-Aufnahmen eines Anhydritkristalls mit randlichen, spaltflächenparallelen Kapillaren aus dem Knäuelsalz der Bohrung RB652 (Teufe 2,43 m bis 2,49 m; Farbcodierung vgl. Tab. 3; kombinierte Aufnahme aller Wellenlängen: unten rechts). Bildgröße: 235,86 µm x 235,86 µm; Z-Eindringtiefe: 20,14 µm.....	77
Abb. 45:	Vergrößerung der kombinierten Stack-Aufnahme in Abb. 44. Der Anhydritkristall aus dem Knäuelsalz der Bohrung RB652 (Teufe 2,43 m bis 2,49 m) ist von zahlreichen spaltflächenparallelen Kapillaren durchzogen (Kapillarlänge 300 nm bis 3 µm; Durchmesser 1 µm bis 30 µm), die unterschiedlich zusammengesetzte KW-Füllungen aufweisen. Bildgröße: 235,86 µm x 235,86 µm; Z-Eindringtiefe: 20,14 µm.....	78
Abb. 46:	Chromatogramm der Anhaftungen an der Oberfläche eines Bohrkerns der Bohrung RB676 aus dem Q1E (Probenahme im Herbst 2011).....	80
Abb. 47:	Abgeschätzter Gehalt an höher siedenden KW aus Schmiermitteln in den aufgelösten Salzproben aus der Bohrkampagne im Herbst 2011. Chronologische Darstellung der Proben von links nach rechts. Die horizontale Linie stellt die Bestimmungsgrenze (BG) von 0,8 mg/kg Gestein dar.....	81
Abb. 48:	Abgeschätzter Gehalt an äußerlich anhaftenden KW für die Probenahmeserie im Frühjahr 2012 (Q1E). Chronologische Darstellung der Bohrungen von links nach rechts. Die horizontale Linie stellt die Bestimmungsgrenze der KW-Analyse von 0,8 mg/kg Gestein dar.....	84

Abb. 49:	Darstellung der Kurzkern-Probenahmebohrungen im Q1E entlang einer Linie der Bohrendpunkte, von RB663 ausgehend Richtung Nordnordwest. Blaue Pfeile deuten die Bohrendpunkte des Statistikproben-Datensatzes an.	87
Abb. 50:	Häufigkeit der ermittelten Gehalte an KW von Salzgesteinsproben der Kurzkernbohrungen aus den Querschlägen 1 Ost und 1 West. Dargestellt sind die Probensätze Statistikproben Q1E (7,5 m - 9,0 m) und die beiden Probensätze Statistikproben und Nachverdichtung aus dem Q1W (siehe HAMMER et al. 2012).	88
Abb. 51:	Darstellung der KW-Gehalte C_1 - C_{40} im Hauptsalz der Proben der Datensätze Statistikproben (7,5 m - 9,0 m) im Q1E (dunkelblau) und der Statistikproben aus Q1W (hellblau gestrichelt) als Whisker-Plots und Einzelproben im Profil sowie in der Häufigkeitsverteilung.	89
Abb. 52:	Darstellung der Methan-Gehalte in den Hauptsalz-Proben der Datensätze Statistikproben (7,5 m - 9,0 m) im Q1E (dunkelblau) sowie der Proben 4,5 m - 6,0 m im Q1E (violett) in der Gegenüberstellung zu den Statistikproben aus Q1W (hellblau gestrichelt) als Whisker-Plots und Einzelproben im Profil sowie in der Häufigkeitsverteilung.	90
Abb. 53:	Darstellung der $C_1/(C_2+C_3)$ -Verhältnisse in den Hauptsalz-Proben im Q1E der Datensätze Statistikproben (7,5 m - 9,0 m; dunkelblau) und im Beprobungsintervall 4,5 m - 6,0 m (violett) als Whisker-Plots und Einzelproben im Profil und in der Häufigkeitsverteilung. Zum Vergleich wurden die Statistikproben aus Q1W (hellblau gestrichelt) in das Histogramm eingezeichnet.	91
Abb. 54:	Darstellung der $\delta^{13}C$ -Werte des Methans in Hauptsalz-Proben der Datensätze der Statistikproben (7,5 m - 9,0 m; dunkelblau) sowie des Beprobungsintervalls 4,5 m - 6,0 m (violett) im Q1E als Whisker-Plots und Einzelproben im Profil sowie in der Häufigkeitsverteilung. Zum Vergleich wurden die Statistikproben aus Q1W (hellblau gestrichelt) in das Histogramm eingezeichnet.	92
Abb. 55:	Annähernd parallel verlaufende KW-Bänder am östlichen Südstoß des Bohrortes 5.0 (vor dessen Erweiterung) bei Kunstlicht (obere Aufnahme) und bei UV-Strahlung (untere Aufnahme). Bei Streckenmeter 46 teilt sich das untere KW-Band kurzzeitig und umfließt ein Anhydritbruchstück (oberhalb des gewinkelten Zollstocks). Das randlich ausgefranste Erscheinungsbild der KW-Bänder ist auf den Beraubungsprozess und damit einhergehende Verschmierungen der KW zurückzuführen (Aufnahmen: DBE).	93

Abb. 56:	Lokal auf den ehemaligen Weststoß des Bohrortes 5.0 beschränkte, größerflächige Verbreitung von KW im Kontaktbereich von KW-Band und Anhydritband unter UV-Strahlung (obere Aufnahme) und bei Kunstlicht (untere Aufnahme). Auffällig sind vor allem das boudinierte Erscheinungsbild des Anhydritbandes und die sichelartige Schliere. Oberhalb der Lutte weist die flächenhafte Verbreitung eine auffällige Keilstruktur auf, die auf zwei Schrämmspuren zurückzuführen ist (untere Aufnahme). Dieser Bereich verdeutlicht, wie die in einem kleinen Band in geringer Menge angetroffenen KW mechanisch über eine größere Fläche verteilt werden (Aufnahmen: DBE).....	94
Abb. 57:	Westerweiterung des Bohrortes 5.0 bei Kunstlicht (obere Aufnahme) und unter UV-Strahlung (untere Aufnahme). Die drei KW-Bänder sowie das im Hangenden der KW-Bänder befindliche, boudinierte Anhydritband folgen der Streichrichtung der Salzgesteine von SW-NE (Aufnahmen: DBE).....	95
Abb. 58:	Probenstreifen aus den Probenfeldern 8 (oben) und 2 (unten) im Bohrort 5.0; Kombinationsaufnahmen aus Auflicht und UV-Strahlung ($\lambda = 254 \text{ nm}$). Die Streifen wurden jeweils annähernd senkrecht zu einem der beiden KW-Bänder im Bohrort 5.0 mittels Winkelschleifer (Schnitttiefe ca. 10 cm) freigeschnitten und mittels Hammer aus dem Stoß herausgebrochen. Das in beiden Streifen enthaltene und räumlich eng begrenzte KW-Band erscheint in den Aufnahmen durch die KW-Fluoreszenz leuchtend blau.....	96
Abb. 59:	Beprobungsschema für das Profil 2A (mittlerer Profilabschnitt) aus Bohrort 5.0 im Nahbereich des fluoreszierenden KW-Bandes.....	99
Abb. 60:	Verteilung der Gesamt-KW-Gehalte im Profil 2A im Bohrort 5.0 (auf der Abszisse ist die Länge des Profils über das fluoreszierende KW-Band an der Aufschlusswand dargestellt).....	101
Abb. 61:	Änderung der relativen Anteile der in den einzelnen Extraktionsschritten nachgewiesenen KW in Anhängigkeit von der Lage der Proben im Profil bzw. von den Gesamt-KW-Gehalten.....	102
Abb. 62:	Vergleichende Darstellung der Chromatogramme der KW-Extrakte aus den vier Extraktionsschritten (Probe 1207828, Bohrort 5.0, Profil 2A, Profilabschnitt zwischen 39 cm und 40 cm).....	103
Abb. 63:	Darstellung der Chromatogramme n-C ₁₀ bis n-C ₄₀ für zwei Proben aus den Feldern 1/C2 und 6A.....	105
Abb. 64:	EDX-Plot eines Dolomitkristalls (Abb. 65 A) aus einer Probe der KW-Bohrung RB648 (Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	107

Abb. 65:	A) Idiomorpher, oberflächlich durch weggelösten Halit und Anhydrit poröser Dolomitkristall mit eingewachsenem Quarzkristall (Pfeil) aus der Bohrung RB648 (Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	108
	B) Aggregat aus idiomorphen Dolomitkristallen (RB659; Teufe 1,82 m bis 1,84 m).....	108
	C) Aggregat aus hypidiomorphen Dolomitkristallen, teilweise lose verwachsen und mit eingeschlossenen, weiß erscheinenden, idiomorphen Pyritwürfeln bzw. -aggregaten (Pfeile) aus der Bohrung RB648 (Teufe 4,01 m bis 4,10 m).	108
	D) Idiomorpher Dolomitkristall mit einspießendem Hohlraum im unteren Bildausschnitt in Folge eines weggelösten Anhydritkristalls (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	108
Abb. 66:	A) Idiomorpher Dolomitkristall mit einem mürben, orangefarbenen bis rötlichbraunen Überzug aus nicht näher zu bestimmenden Eisenoxiden/-hydroxiden (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	109
	B) Starke Vergrößerung des orangefarbenen bis rötlichbraunen Überzugs. Die einzelnen Eisenoxid/-hydroxidkristalle erscheinen blättrig/stängelartig bzw. zu Aggregaten verklumpt (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	109
Abb. 67:	A) Idiomorpher Pyritkristall (Pentagondodekaeder) mit glatten Kristallflächen und scharfen Kanten (RB659; Teufe 1,82 m bis 1,84 m).....	110
	B) Idiomorpher Pyritkristall (Würfel bis beginnender Kuboktaeder) mit erkennbarer Flächenstreifung neben einem Tonaggregat (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	110
	C) Hypidiomorphes Pyritaggregat aus zahlreichen kleinen und großen Pyritkristallen mit teilweise poröser Oberfläche auf Grund weggelöster Halit- und Anhydritkristalle (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	110
	D) Hypidiomorphes Pyritaggregat mit teilweise poröser Oberfläche auf Grund weggelöster Halit- und Anhydritkristalle. Auffällig sind ringartige Strukturen im linken, unteren Pyritkristall, bei denen es sich um Kohlenstoffverbindungen (vermutlich anhaftende KW) handelt (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	110
Abb. 68:	A) Idiomorphe wasserklare Quarzdoppelender mit perfekten Kristallflächen (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	111
	B) Kleines Quarz-Gwindel aus wasserklaren Quarzkristallen (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	111

Abb. 69:	A) Idiomorphe intakte Kristalle von Pyrit (Kuboktaeder mit Flächenstreifung, oben), Quarz (Doppelender, mittig rechts) und ein zerbrochener Kali-Feldspat (unten) aus der Bohrung RB648 (Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	112
	B) Idiomorphe Kali-Feldspäte mit intakten Kristallflächen (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	112
	C) Stängeliger, randlich ausgefranter Coelestinkristall mit zahlreichen Bruchflächen neben einem oberflächlich porösen Dolomitkristall (links; RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	112
	D) Idiomorpher Fluoritkristall mit löchrig-poröser Oberfläche neben einem kleinen verzerrten Quarzkristall (rechts; RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).	112
	E) Xenomorphes Aggregat aus zwei miteinander verwachsenen Galenitkristallen (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	112
	F) Hypidio- bis idiomorphes, mittels EDX nicht weiter spezifizierbares Lanthan-Karbonat neben idiomorphen, teilweise beschädigten Quarzdoppelendern, sowie Kali-Feldspäten (RB648; Teufe 4,01 m bis 4,10 m).....	112
Abb. 70:	Übersicht zu den KW-Packerbohrungen im Q1E, Bohrort 1.2, Bohrort 3.1 und im Bohrort 5.0.....	115
Abb. 71:	Lokation der Bohrung RB694 im Bohrort 1.2.....	117
Abb. 72:	Gemessener Druckaufbau in der Bohrung RB687.....	120
Abb. 73:	Zeitliche Veränderung der berechneten Massenflussrate und des gemessenen Intervalldruckes in der Bohrung RB688.....	121
Abb. 74:	Kumulatives Gas- und Kondensatvolumen aus der Bohrung RB685 unter Normalbedingungen.....	122
Abb. 75:	Kumulatives Gas- und Kondensatvolumen aus der Bohrung RB688 unter Normalbedingungen.....	123
Abb. 76:	Kumulatives Gas- und Kondensatvolumen aus der Bohrung RB689 unter Normalbedingungen.....	123
Abb. 77:	Lokation und Kernbeschreibung der Bohrung RB688 (oben links: Schema zur Lage der Packerbohrungen im Umfeld des Q1W; unten links: Photo des Streckenstoßes im Bereich der Bohrung RB688, Breite des Photos ca. 1,5 m; rechts: Dokumentation der Bohrkerne aus der Bohrung RB688 unter natürlichem Licht (links) und UV-Strahlung (rechts), aus: HAMMER et al. 2012).....	125
Abb. 78:	Theoretischer Einflussradius im Gebirge um die KW-Packerbohrungen.....	126
Abb. 79:	Theoretisches Einflussvolumen im Gebirge um die KW-Packerbohrungen.....	126
Abb. 80:	Gegenüberstellung zweier ausgewählter Druckaufbaukurven und der Zutrittsraten für die Bohrung RB688 vom Oktober 2011 bzw. 2012.....	127
Abb. 81:	Gegenüberstellung zweier ausgewählter Druckaufbaukurven und der Zutrittsraten für die Bohrung RB688 vom Oktober 2011 bzw. 2012.....	128

Abb. 82:	Kerndokumentation (links), Lokation und Anordnung (mittig und rechts oben) und Druckaufbaumessungen für die Bohrungen RB689 und RB691.....	129
Abb. 83:	Experimentell deformierte Gorleben-Hauptanhydritlage in Asse-Steinsalzmatrix (aus: ZULAUF et al. 2010). A) Neck-Bereich einer boudinierten Anhydritlage (A). Der nicht verheilte Hohlraum zwischen viskos eingedrungenem Halit (H) ist ausgekleidet mit organischer Substanz, die offensichtlich die Verheilung lokal behinderte. Aufnahme unter Auflicht..... B) Grenzbereich von Anhydrit (A) zu Halitmatrix (H). Eine radialstrahlige Mikroriss-Bildung mit daran gebundener lokaler Fluidmigration ist ausgehend vom Anhydrit in die Halitmatrix hinein zu erkennen. Aufnahme im Durchlicht, bestehend aus 15 Einzelaufnahmen verschiedener Fokusebenen. Möglicherweise ist die Bildung der Rissfächer auf den Gewinnungsprozess der Proben (Bohren) oder die Schlifffherstellung zurückzuführen.....	132 132
Abb. 84:	Mikrorissentwicklung und Fluidwanderung innerhalb von Anhydritkristallen bei Aufheizung von 20°C (A, C und E) auf 250°C (B, D und F). Probe RB652.010_2_2. Die Photos A) und B) zeigen ein sukzessives Ausbreiten von dunklen Fluidfilmen (Pfeile) innerhalb der Anhydritkristalle bei steigender Temperatur. Es findet keine Fluidausbreitung in die umgebende Halitmatrix statt. C) und D) bis 250°C bildeten sich entlang der Spaltflächen mit Fluid gefüllte Risse (Pfeile). Eine Verdunkelung speziell im Bereich des Anhydritclusters (rechts unten) ist charakteristisch bei erhöhten Temperaturen. Probe RB653.007_4. E) und F) Der Anhydritkristall weist eine Verdunkelung und die Ausbildung eines neuen Risses entlang einer Spaltfläche (Pfeil) auf. Ein vorhandener Mikroriss (entlang einer Spaltfläche) und der Grenzbereich von Anhydrit zu Halit erscheinen bei 250°C (F) deutlich dunkler. Probe RB653.007_2 (Photos: N. Thiemeyer).....	135
Abb. 85:	Schrittweise Darstellung der Entwicklung eines Dünnschliff-Bereiches der Probe RB687.005_CT_2 bei steigender Temperatur. Die bei 250°C entstandenen Fluidmuster (F, gelbe Signatur) sind unter A) bei 20°C bereits teilweise ausgebildet. Die klaren Fluidmuster im Zentrum des Anhydritkristalls verändern sich bei der Aufheizung nicht. Ebenso migrieren keine Fluidphasen in die Halitmatrix. Die Verdunkelung zeigt sich vor allem bei den in einer anderen Fokusebene liegenden Anhydritkristallen (links oben). Unter C) zeigt sich bis 100°C ein leichtes Hellerwerden dieses Abschnittes, bis dann bei 250°C dieser komplett verdunkelt ist. Hierbei könnte es sich zuerst um eine Umverteilung von Fluiden handeln und dann final um Mikrorissbildungen, die beträchtliche Fluidanteile in die Anhydritnester migrieren lassen (Photos: N. Thiemeyer).....	137

- Abb. 86: A) Halitkorngrenze mit Anhydritkristallen in der Probe RB655.016_2_5 mit dunklen Fluideinschlüssen in Tropfenform und helleren Schlieren bei 20°C. Im Zuge der Aufheizung tritt eine Verdunkelung bis 250°C (D) ein. Beim Übergang von B) zu C) zeigt sich eine plötzliche Veränderung der Fluidverteilungen bei 180-190°C, die vermutlich durch das Aufweiten der Halitkorngrenze verursacht wird. Die schwarzen Fluideinschlüsse werden dabei von einem dünnen Fluidfilm umflossen und bleiben ortsfest. Die Quelle des Fluidfilms wird im Bereich der Anhydritkristalle (rechts unten) vermutet (Photos: N. Thiemeyer).....138
- Abb. 87: Flachliegende Halitkorngrenze mit Fluideinschlüssen in der Probe RB655.016_2_1. Eine Verdunkelung ist hier nur marginal im Bereich des Anhydritkristalls am oberen linken Bildrand unter B) zu erkennen. Die weiße Signatur markiert den Bereich der Korngrenzfluide, die bei Aufheizung auf 250°C verschwinden. Bei Abkühlung zurück auf Raumtemperatur nehmen diese Fluide wieder die exakte Ausgangsposition wie unter A) ein. Es handelt sich somit um einen reversiblen Prozess, der bei fehlender Mikrorissbildung weitläufige Fluidmigration ausschließt. Die großen Korngrenzfluide bleiben während der gesamten Aufheizphase unverändert in Lage und Form (Photos: N. Thiemeyer).....139

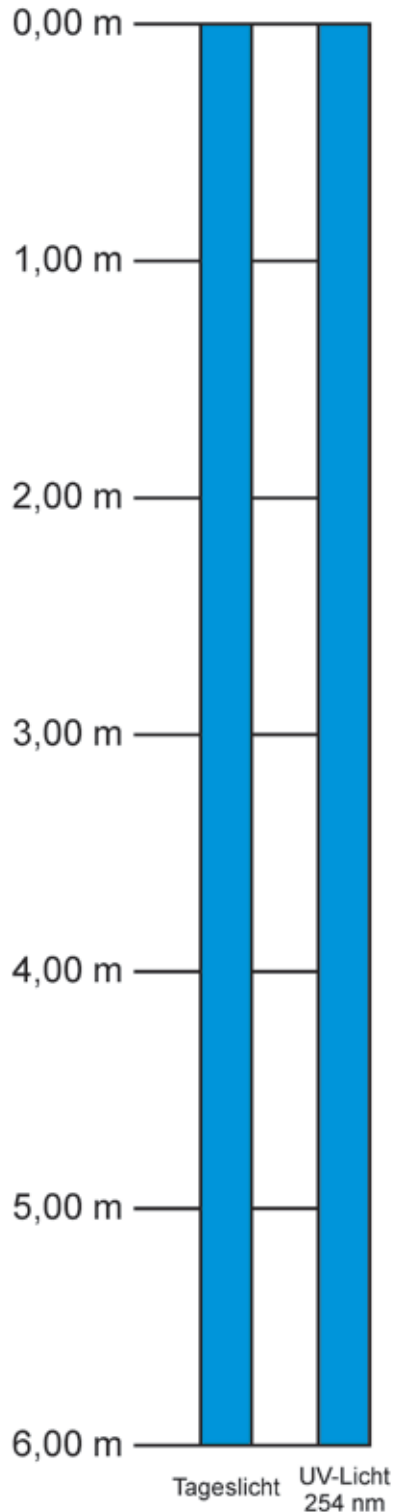
Anhangverzeichnis	Seite
Anhang 1:	174
KW-Profil RB663	
Anhang 2:	175
KW-Profil RB664	
Anhang 3:	176
KW-Profil RB665	
Anhang 4:	177
KW-Profil RB666	
Anhang 5:	178
KW-Profil RB667	
Anhang 6:	179
KW-Profil RB668	
Anhang 7:	180
KW-Profil RB669	
Anhang 8:	181
KW-Profil RB670	
Anhang 9:	182
KW-Profil RB671	
Anhang 10:	183
KW-Profil RB672	
Anhang 11:	184
KW-Profil RB673	
Anhang 12:	185
KW-Profil RB674	
Anhang 13:	186
KW-Profil RB675	
Anhang 14:	187
KW-Profil RB676	

Anhang 15:	188
KW-Profil RB677	
Anhang 16:	189
KW-Profil RB678	
Anhang 17:	190
KW-Profil RB679	
Anhang 18:	191
KW-Profil RB680	
Anhang 19:	192
KW-Profil RB681	
Anhang 20:	193
KW-Profil RB682	
Anhang 21:	194
KW-Profil Packerbohrung RB693	
Anhang 22:	195
KW-Profil Packerbohrung RB694	
Anhang 23:	196
KW-Profil Packerbohrung RB695	
Anhang 24:	197
KW-Profil Packerbohrung RB696	
Anhang 25:	198
KW-Profil Packerbohrung RB697	
Anhang 26:	199
KW-Profil Packerbohrung RB698	
Anhang 27:	200
KW-Profil Packerbohrung RB699	
Anhang 28:	201
KW-Profil Packerbohrung RB700	
Anhang 29:	202
KW-Profil Packerbohrung RB701	

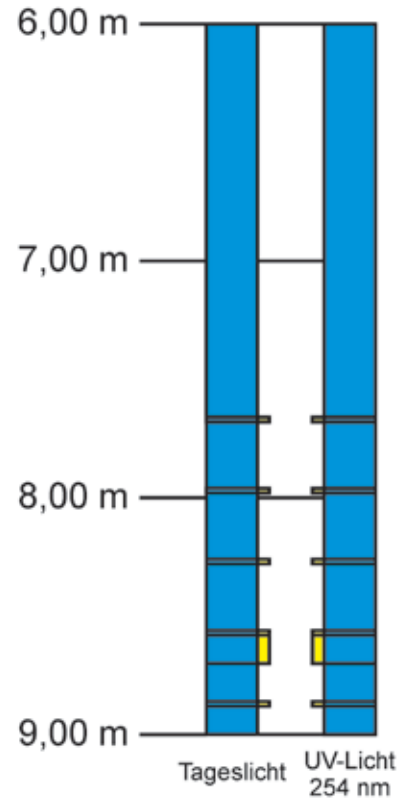
Anhang 30:	203
KW-Profil Packerbohrung RB702	
Anhang 31:	204
Datensatz „Statistikproben“ (7,5 - 9,0 m) Querschlag Ost	
Anhang 32:	206
Datensatz Proben 4,5 - 6,0 m Querschlag Ost	

Anhang 1:

KW-Profil RB663



02YEQ01 RB663



Bei 0,00 m bis 6,00 m ölige Kernoberfläche und Geruch nach Teppichgummi; bei 1,50 m und 3,00 m bis 3,10 m bereichsweise mit braunem Fett kontaminiert.

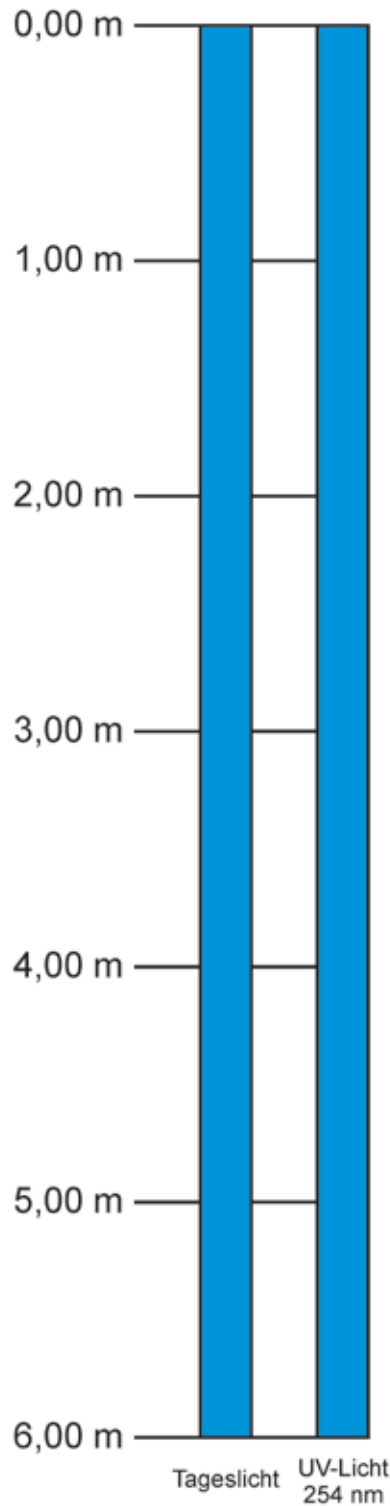
Bei 1,88 m bis 1,93 m rötlich fluoreszierende Ausblühungen (abreibbar) auf verfallener Anhydritlage.

Bei 0,00 m bis 9,00 m orange fluoreszierender Kern.

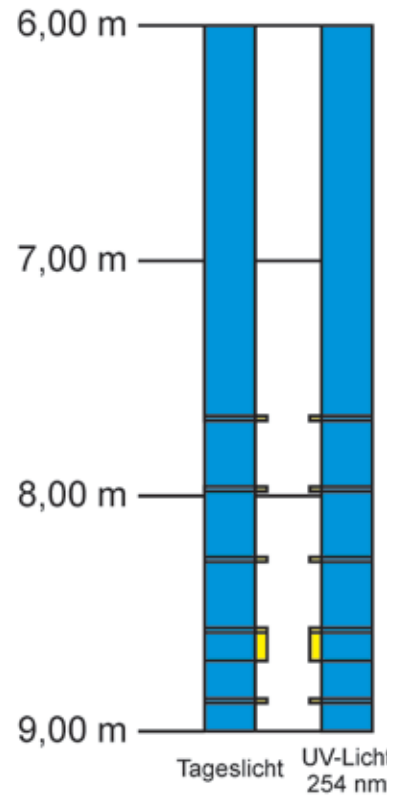
-  KW-Probe für KW-Geochemie
-  z2HS2 optisch unauffällig

Anhang 2:

KW-Profil RB664




02YEQ01 RB664



Bei 0,00 m bis 6,00 auffälliger Geruch nach Knetmasse.

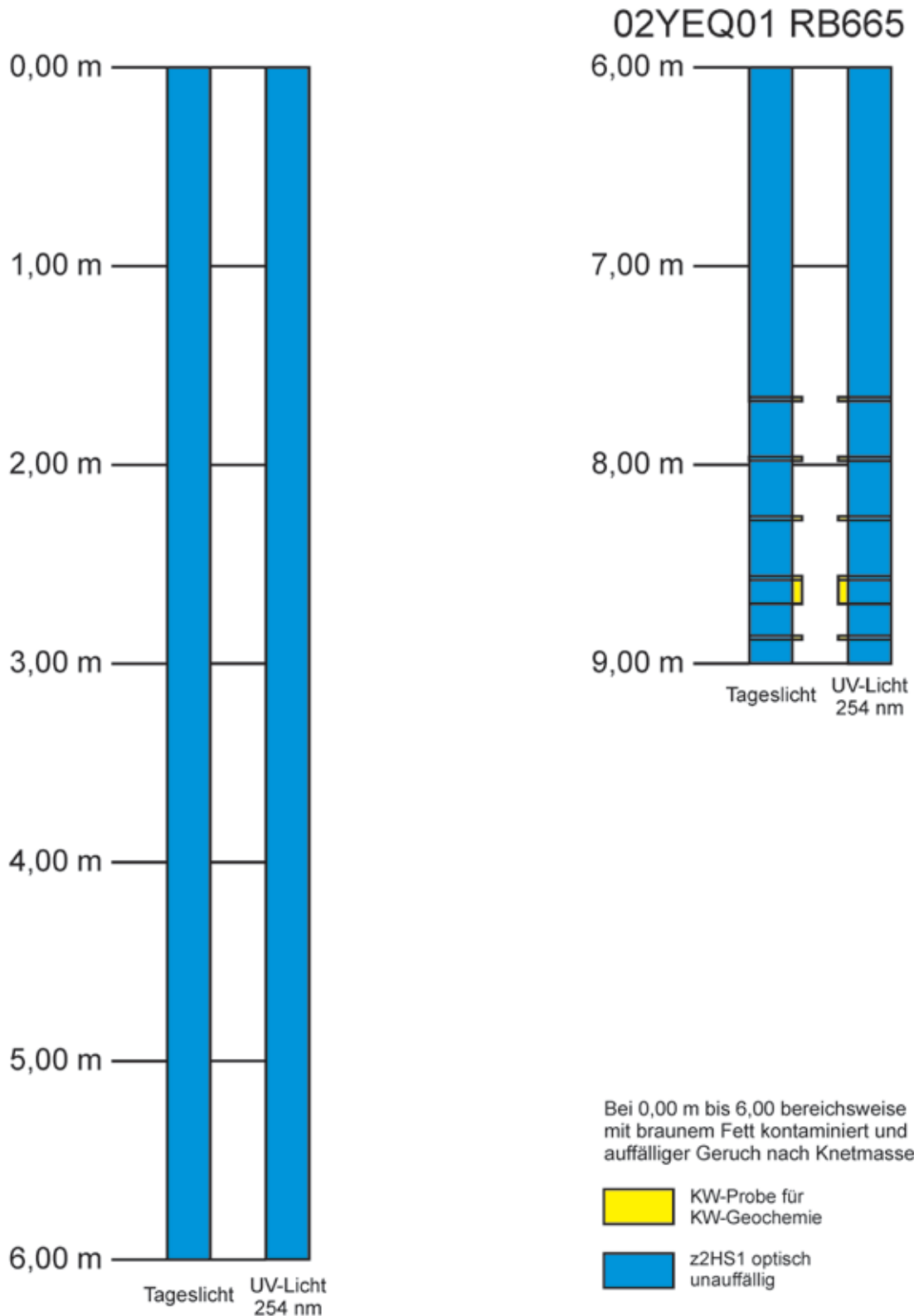
Bei 0,00 m bis 4,68 m gelblich orange fluoreszierender Kern. Zwischen 4,68 m bis 4,96 m, ca. 15° von der Bohrachse abweichender Übergang in den bis zur Endteufe nicht mehr fluoreszierenden Kernbereich.

 KW-Probe für KW-Geochemie

 z2HS1 optisch unauffällig

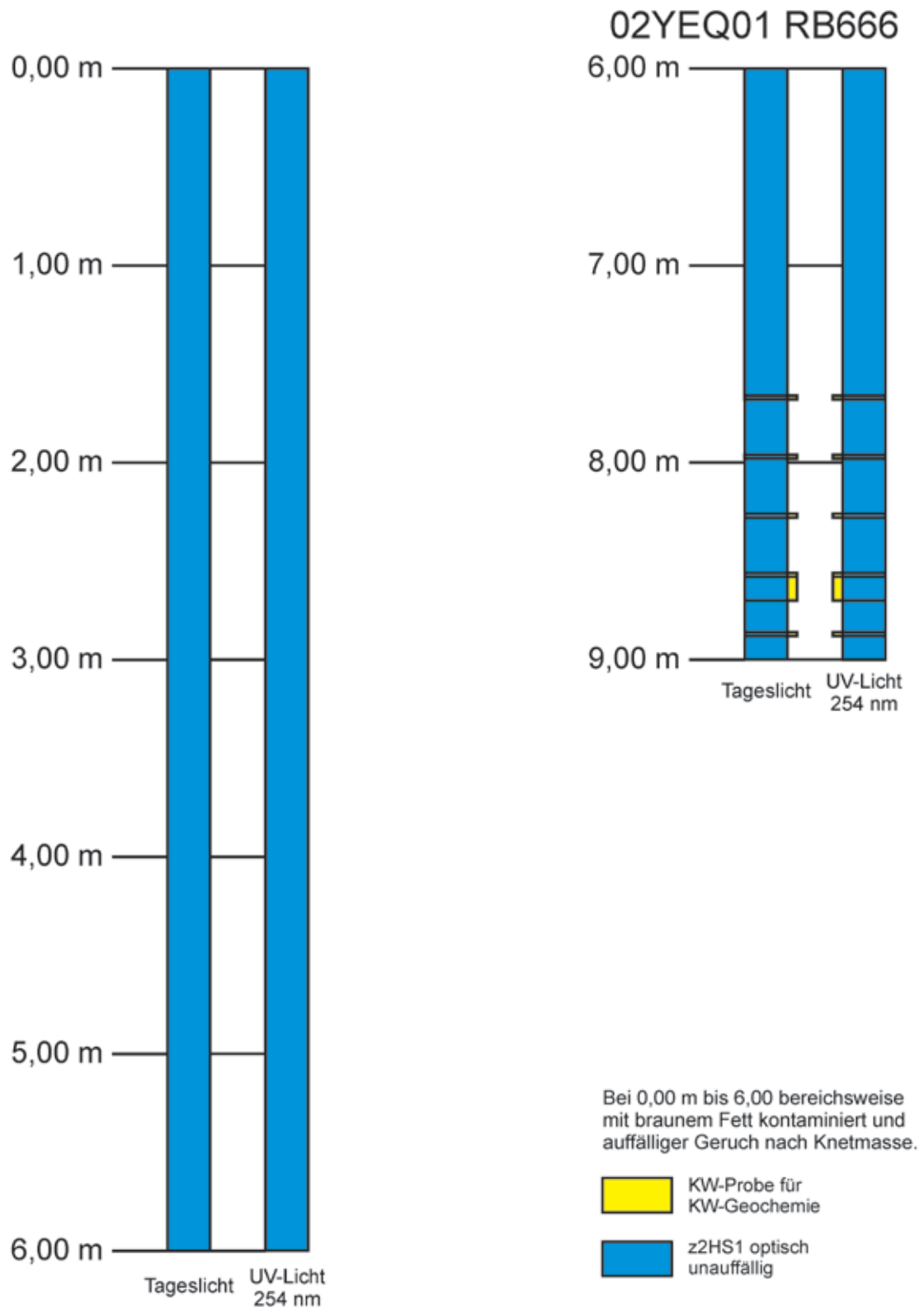
Anhang 3:

KW-Profil RB665



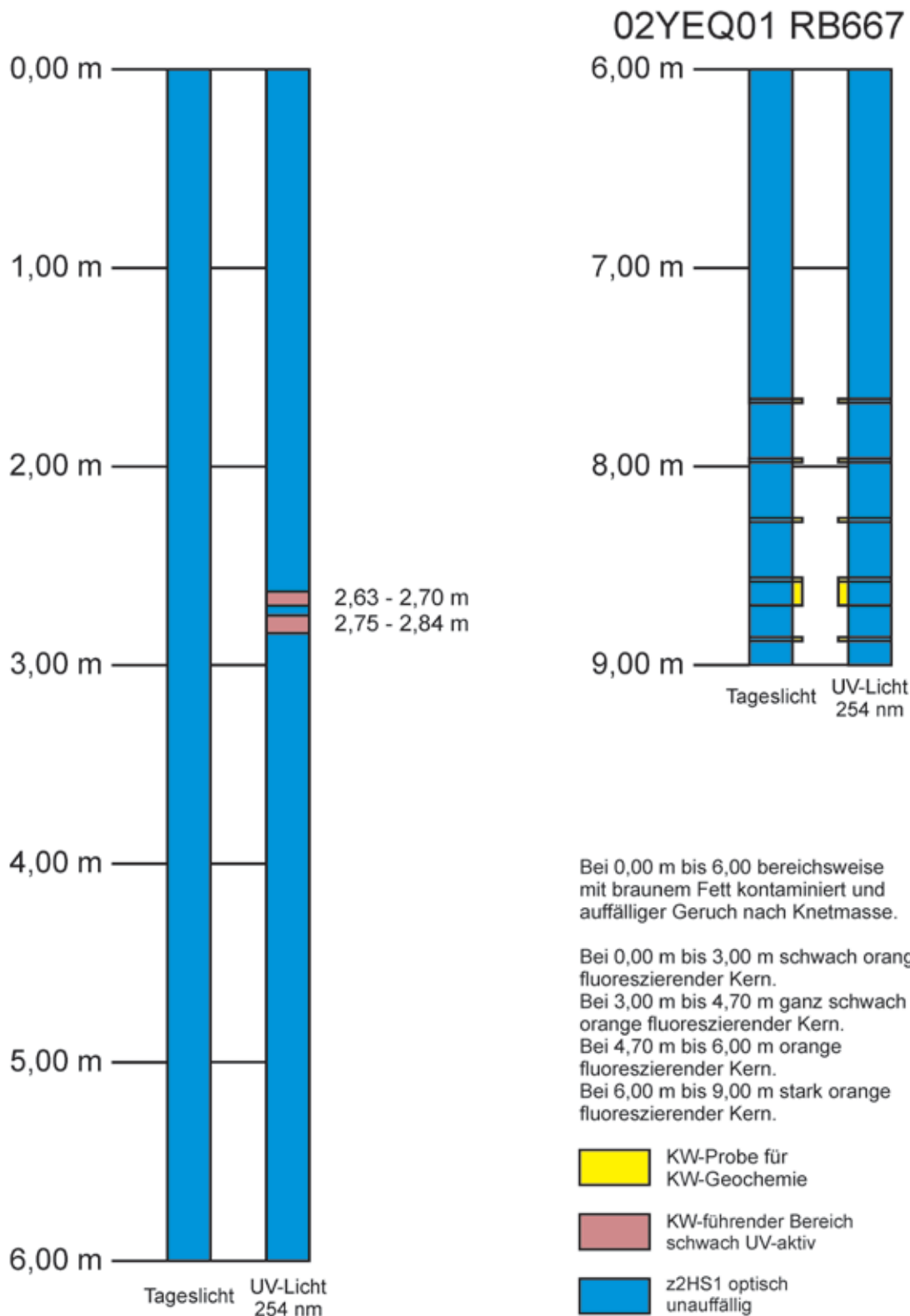
Anhang 4:

KW-Profil RB666



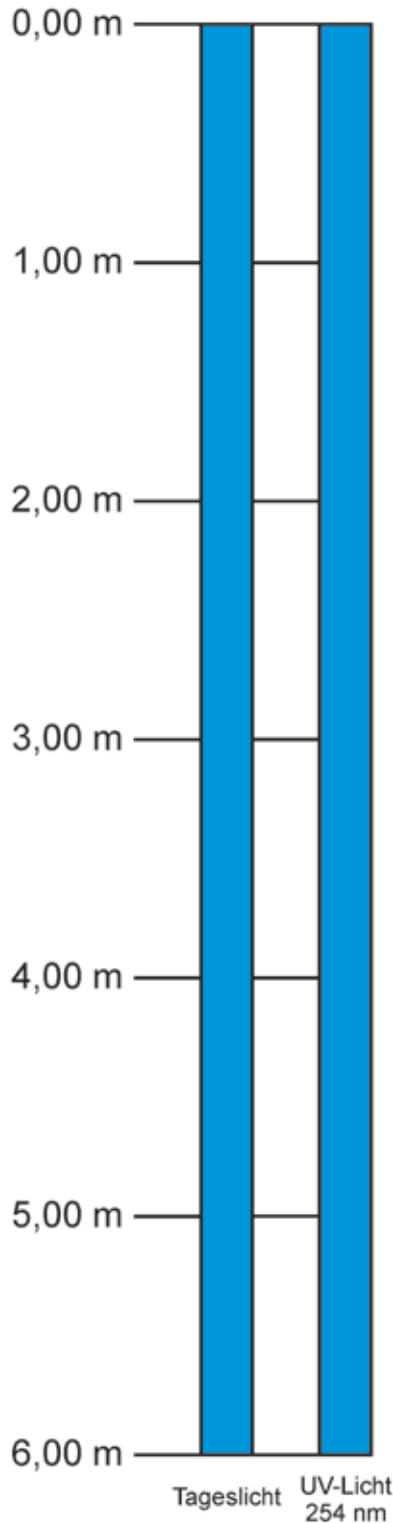
Anhang 5:

KW-Profil RB667

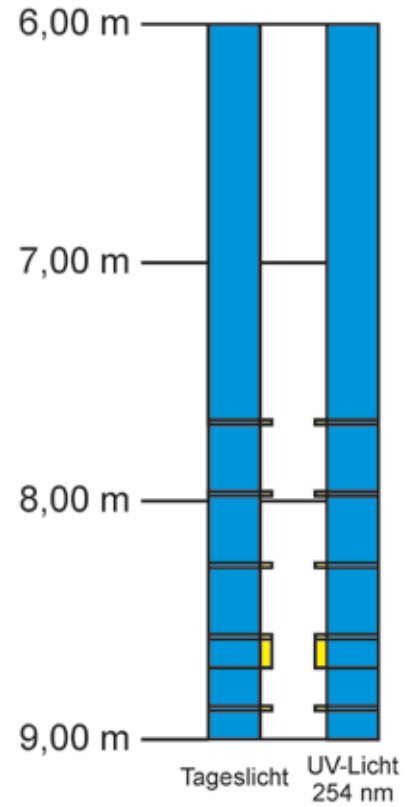


Anhang 6:

KW-Profil RB668




02YEQ01 RB668



Bei 0,00 m bis 6,00 m bereichsweise mit braunem Fett kontaminiert und auffälliger Geruch nach Knetmasse.

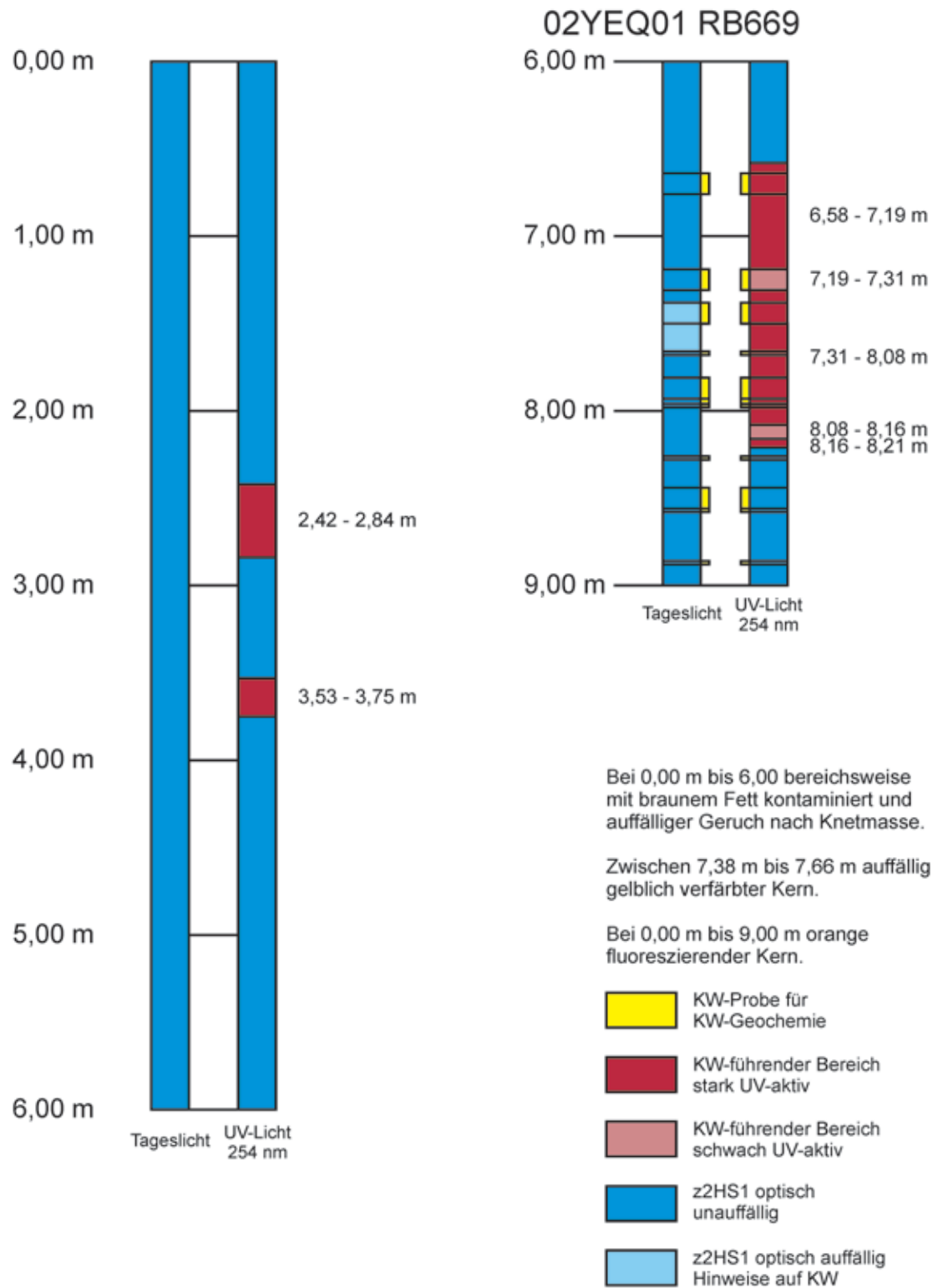
Bei 0,00 m bis 9,00 m orange fluoreszierender Kern.

 KW-Probe für KW-Geochemie

 z2HS1 optisch unauffällig

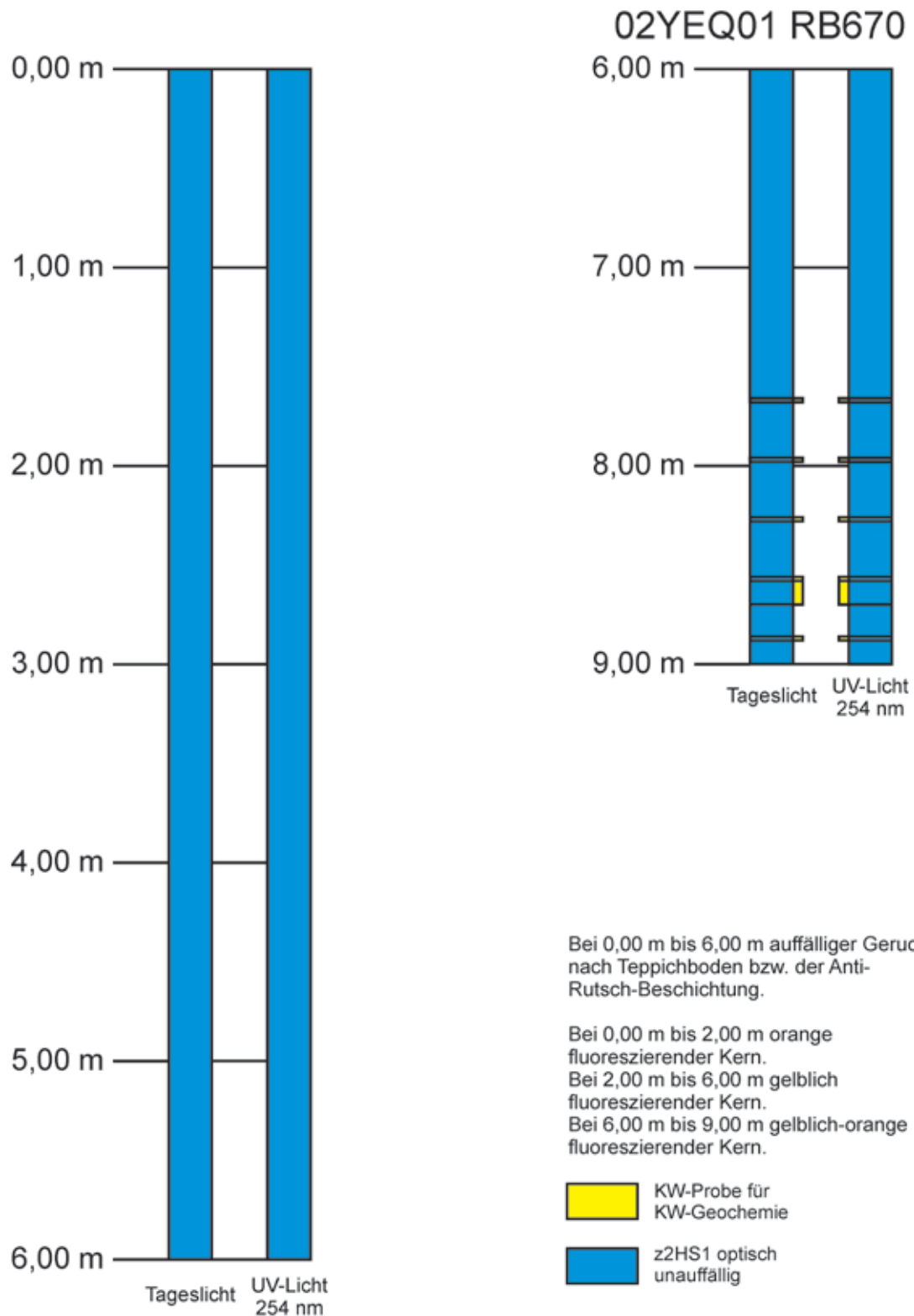
Anhang 7:

KW-Profil RB669



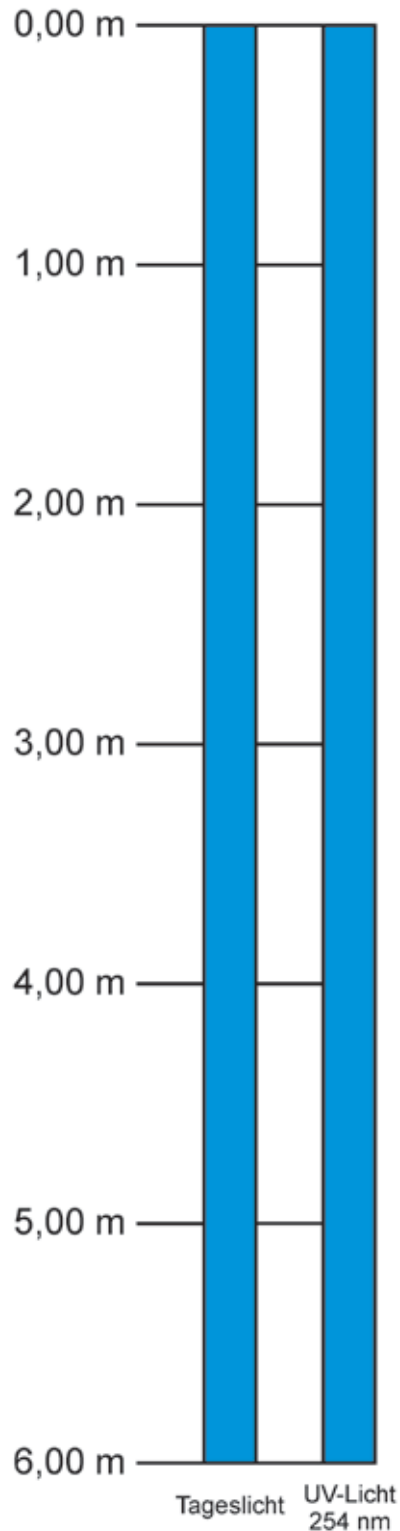
Anhang 8:

KW-Profil RB670

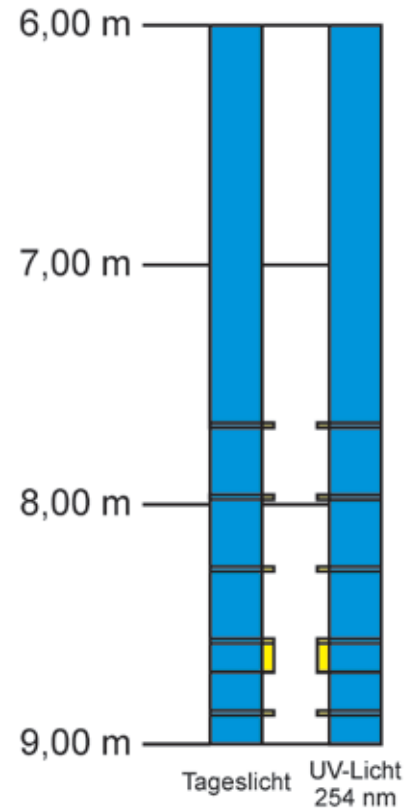


Anhang 9:

KW-Profil RB671



02YEQ01 RB671




Bei 0,00 m bis 6,00 m bereichsweise mit braunem Fett kontaminiert und auffälliger Geruch nach Knetmasse.

Bei 0,00 m bis 4,50 m und bei 5,95 m bis 9,00 m fahl hellgelb fluoreszierender Kern.

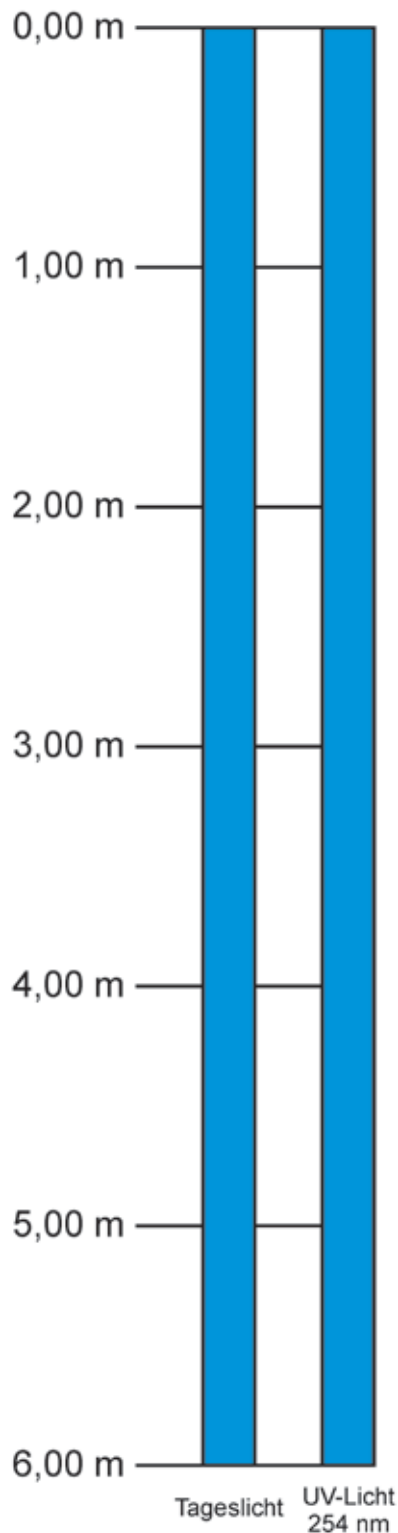
Bei 4,50 m bis 5,95 m und bei 7,50 m bis 9,00 m fahlhellgelb bis orange fluoreszierender Kern.

 KW-Probe für KW-Geochemie

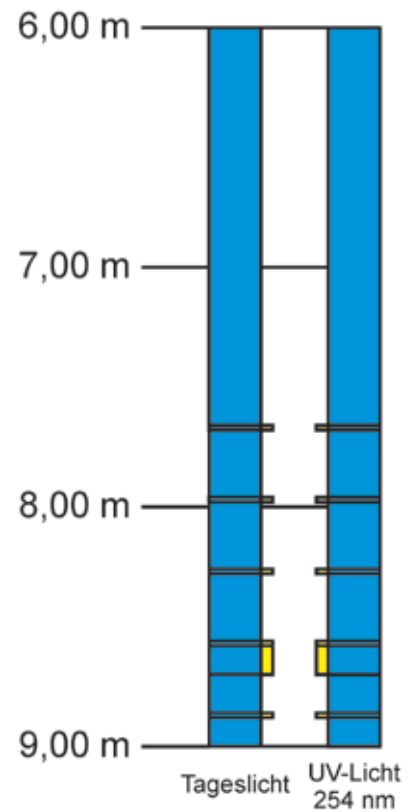
 z2HS1 optisch unauffällig

Anhang 10:

KW-Profil RB672




02YEQ01 RB672



Bei 0,00 m bis 6,00 m bereichsweise mit braunem Fett kontaminiert und auffälliger Geruch nach Knetmasse.

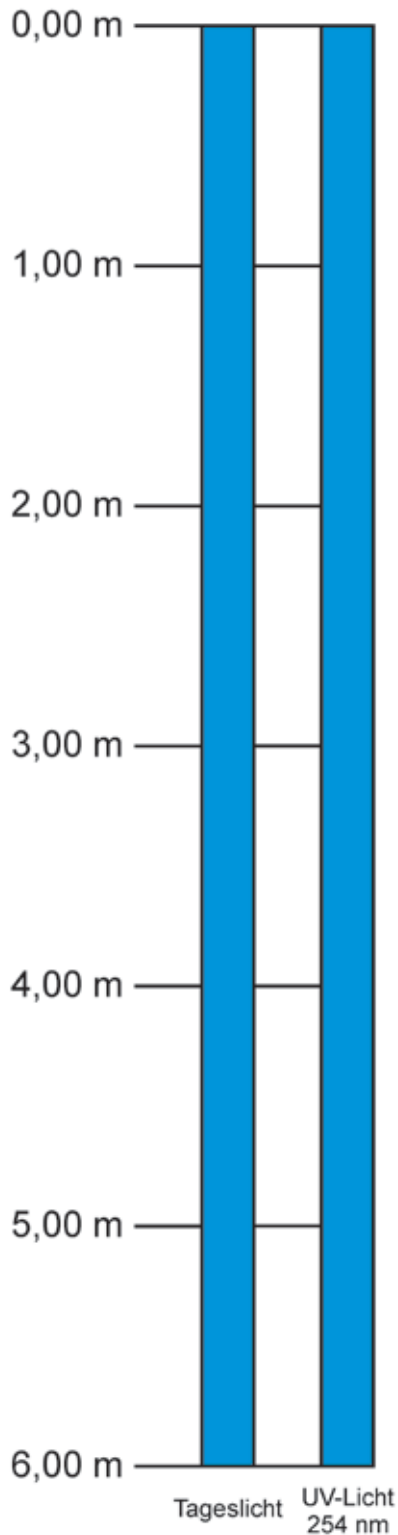
Bei 0,00 m bis 9,00 m orange fluoreszierender Kern.

 KW-Probe für KW-Geochemie

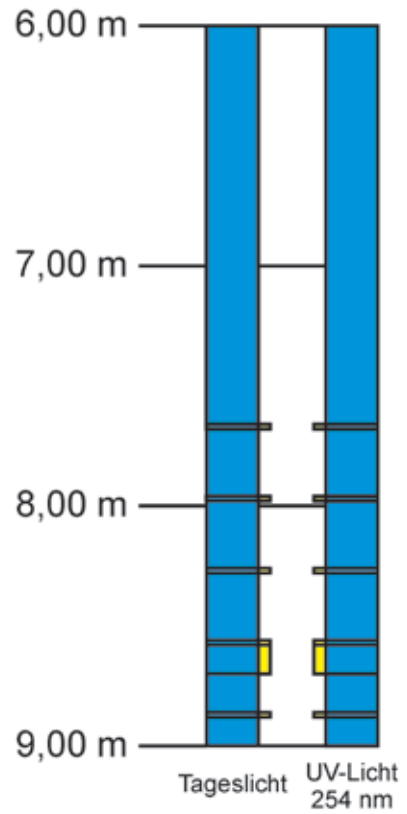
 z2HS1 optisch unauffällig

Anhang 11:

KW-Profil RB673



02YEQ01 RB673

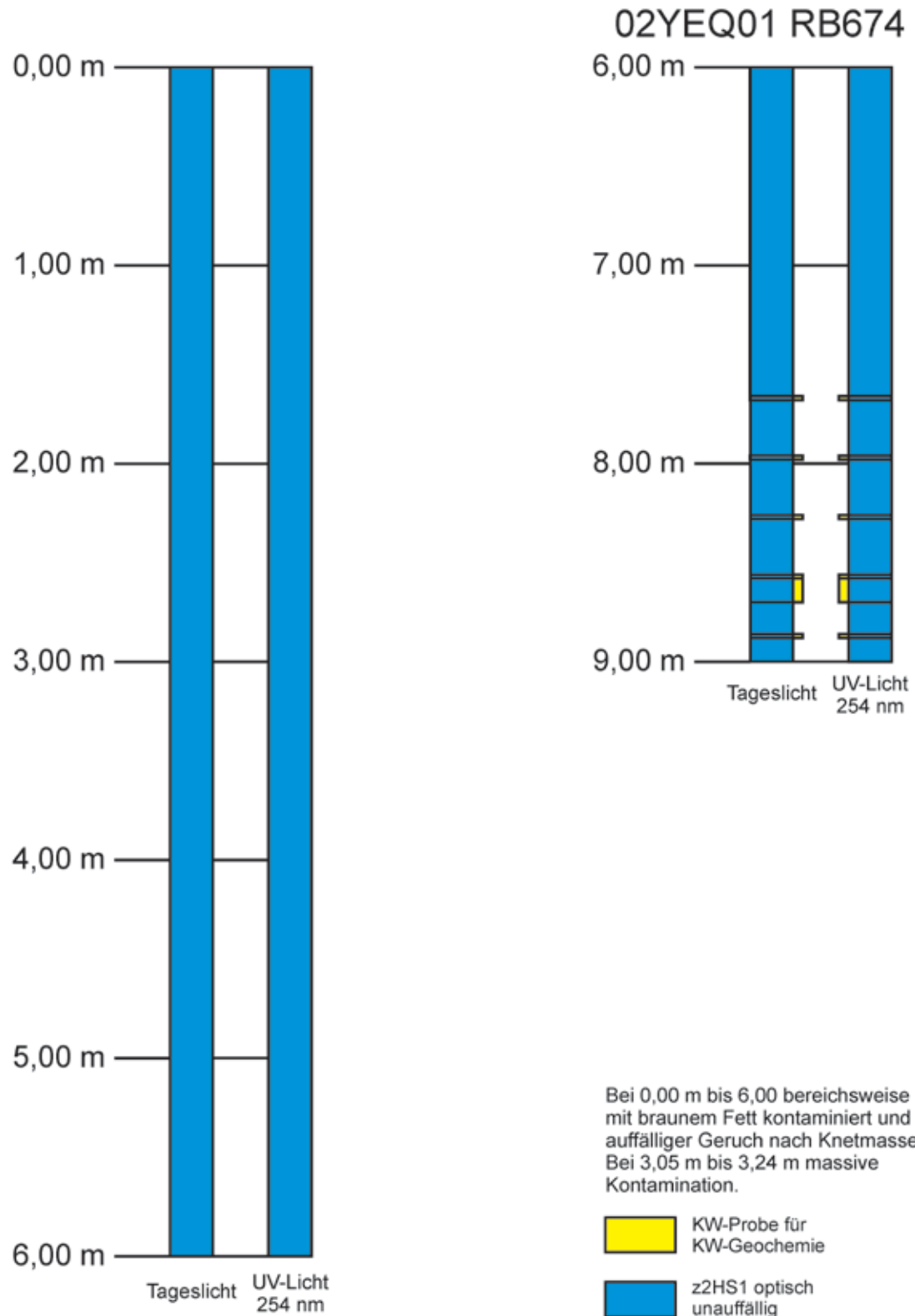


Bei 0,00 m bis 6,00 m bereichsweise mit braunem Fett kontaminiert und auffälliger Geruch nach Knetmasse.

-  KW-Probe für KW-Geochemie
-  z2HS1 optisch unauffällig

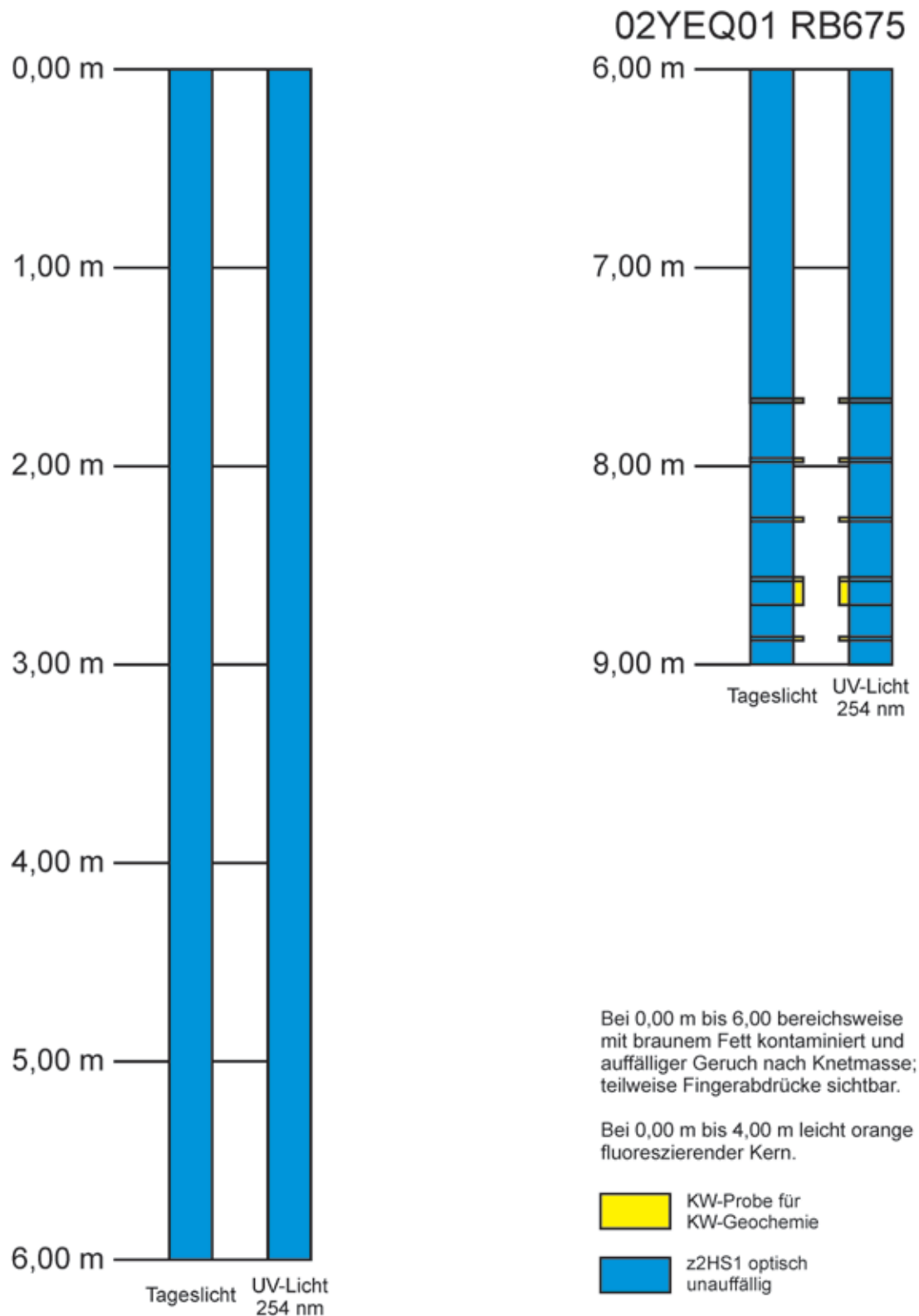
Anhang 12:

KW-Profil RB674



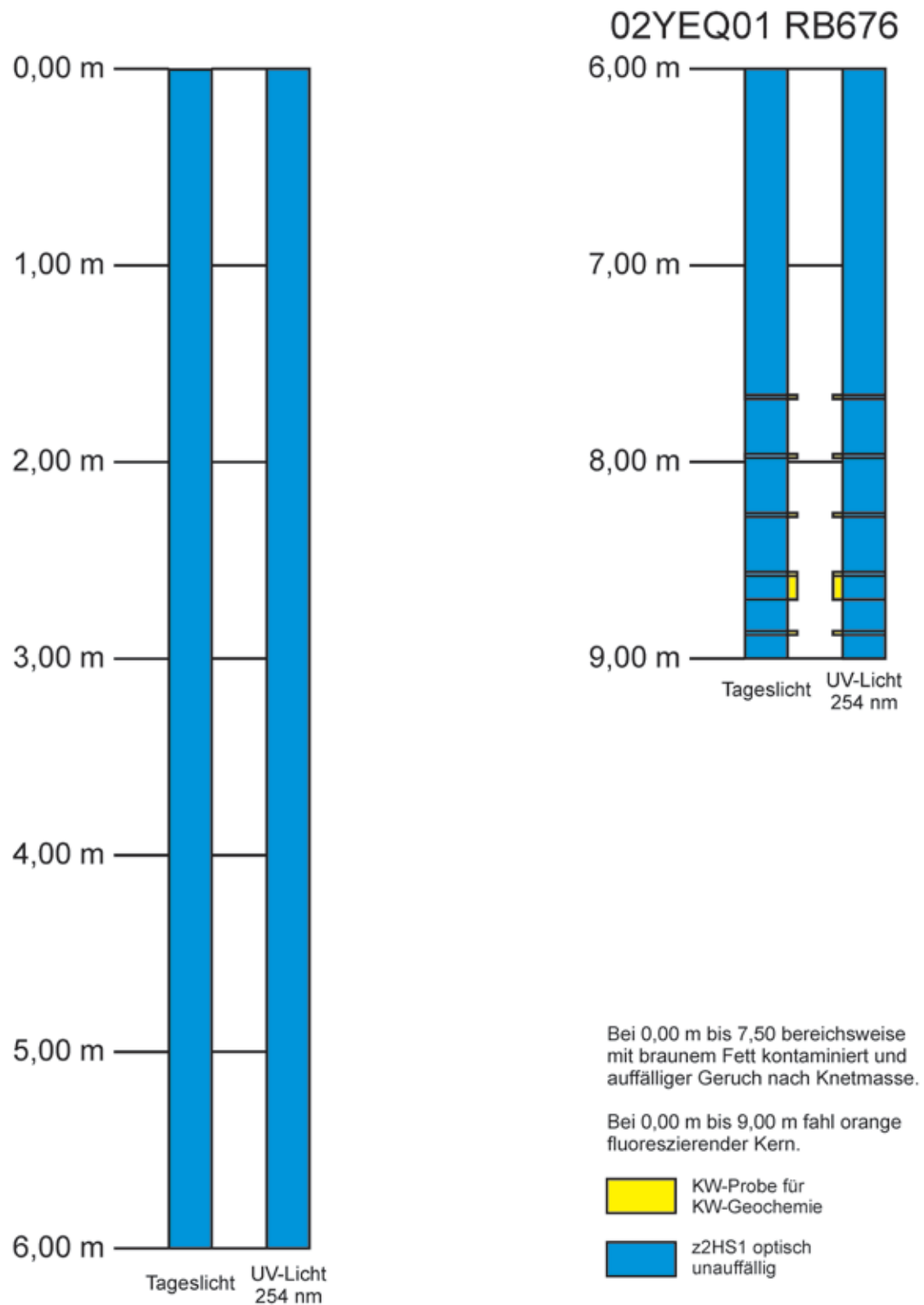
Anhang 13:

KW-Profil RB675



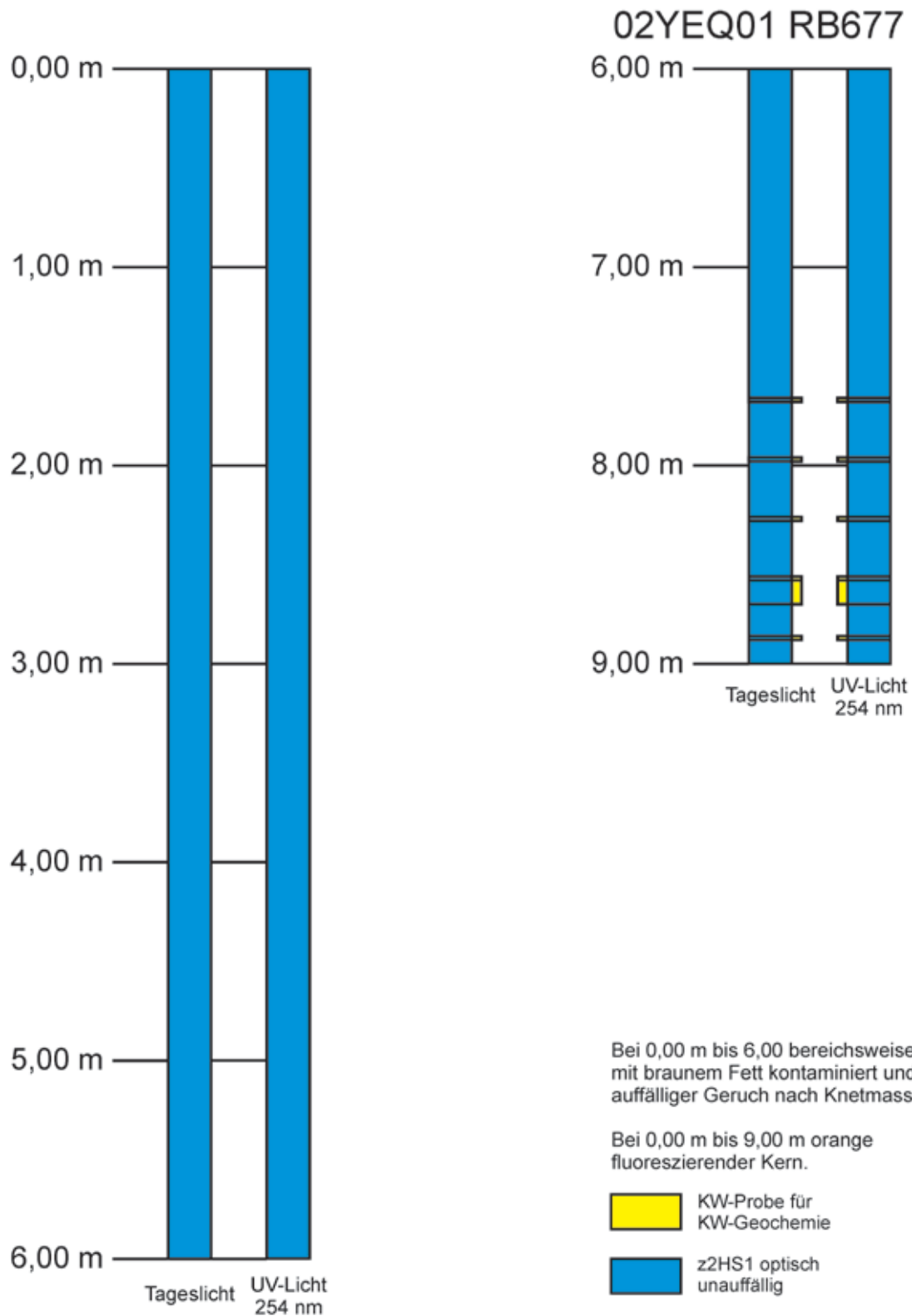
Anhang 14:

KW-Profil RB676



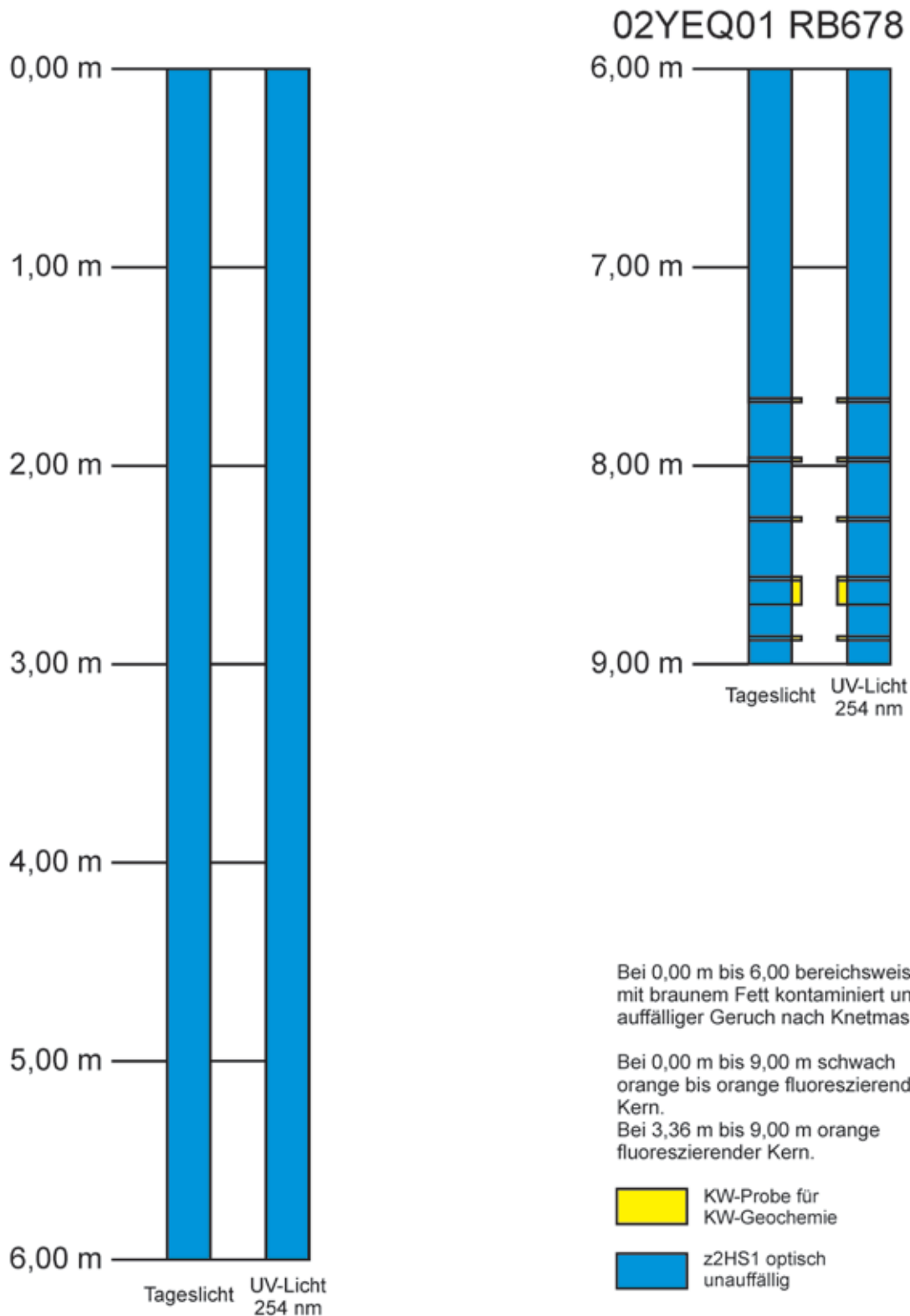
Anhang 15:

KW-Profil RB677



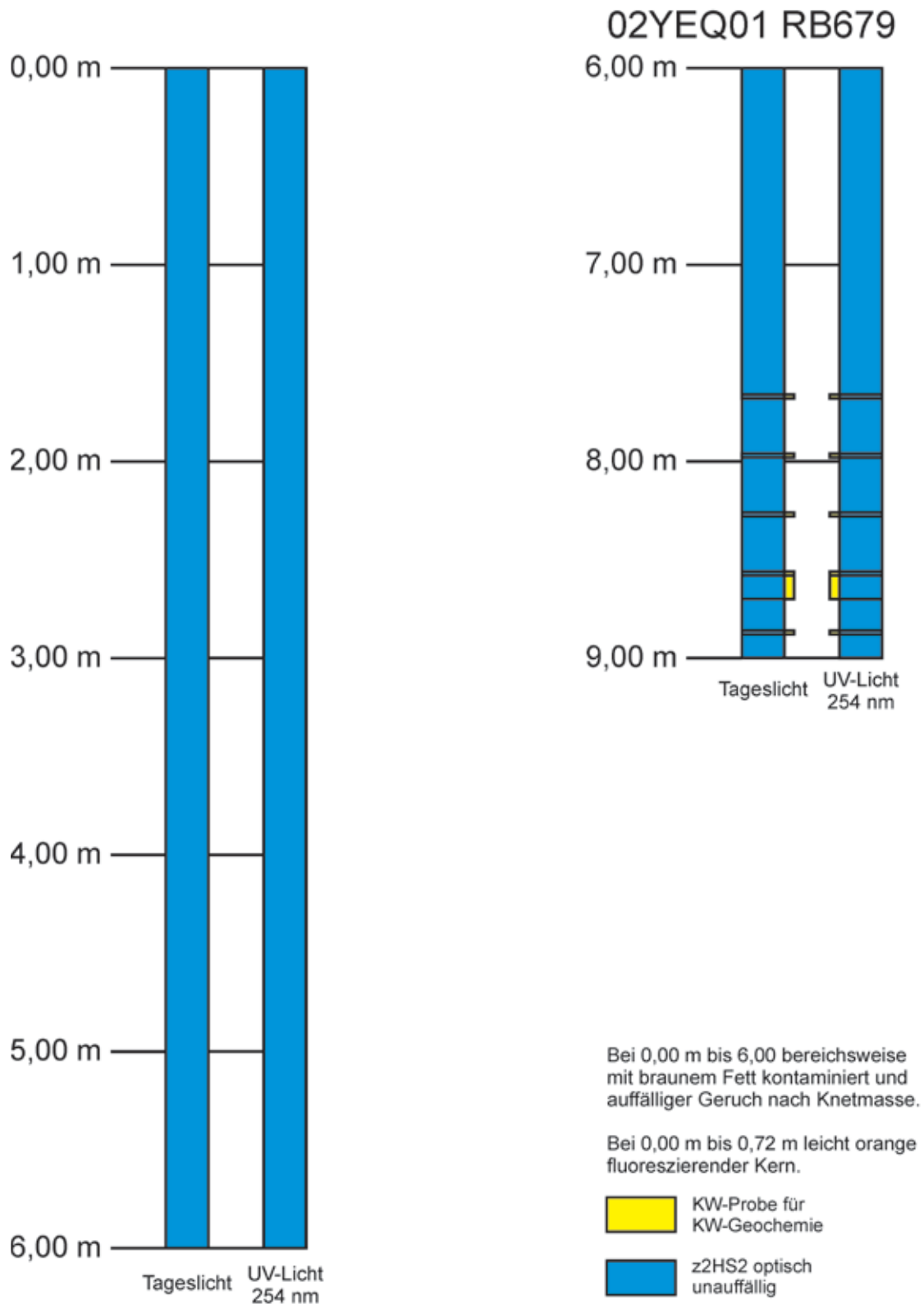
Anhang 16:

KW-Profil RB678



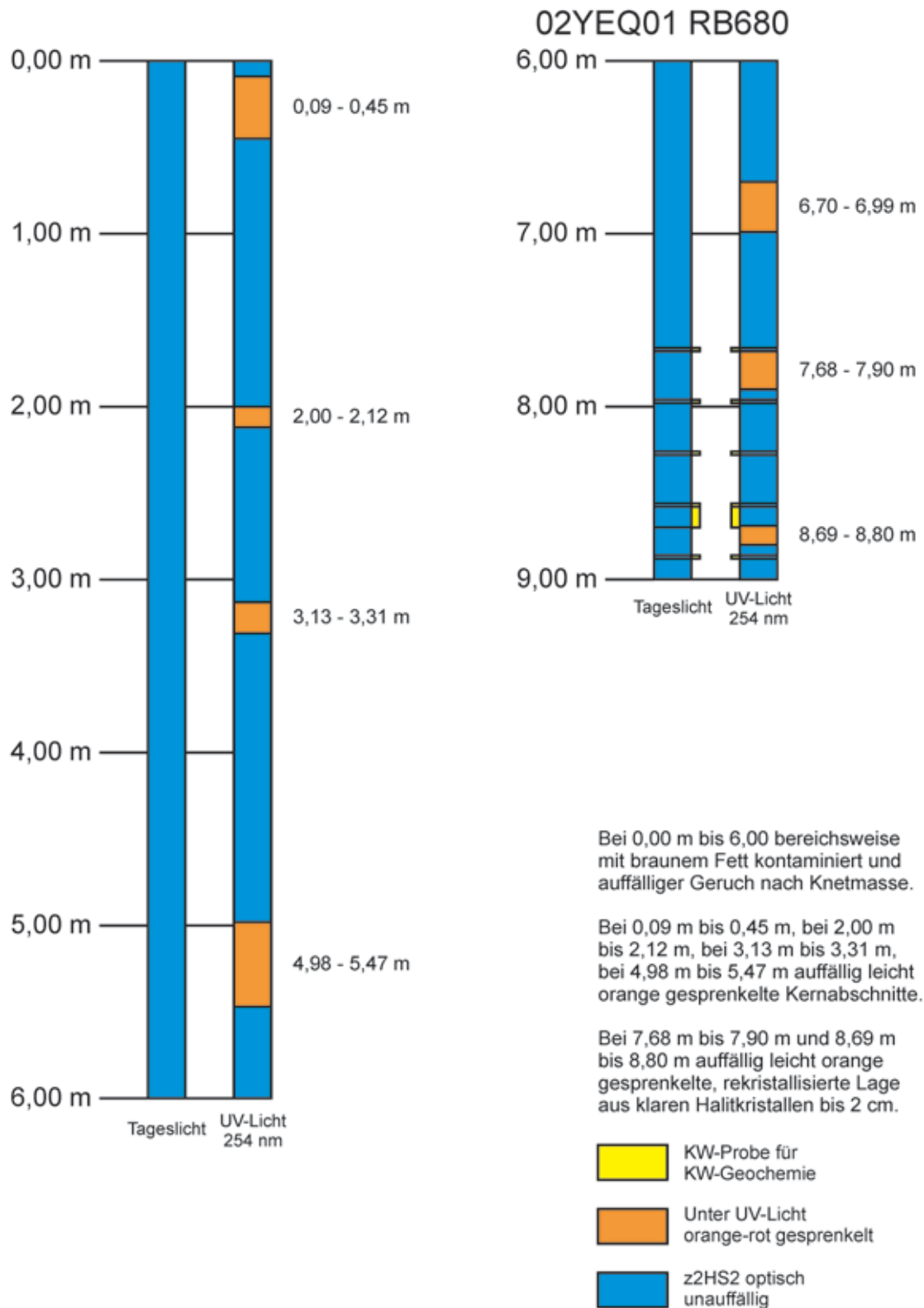
Anhang 17:

KW-Profil RB679



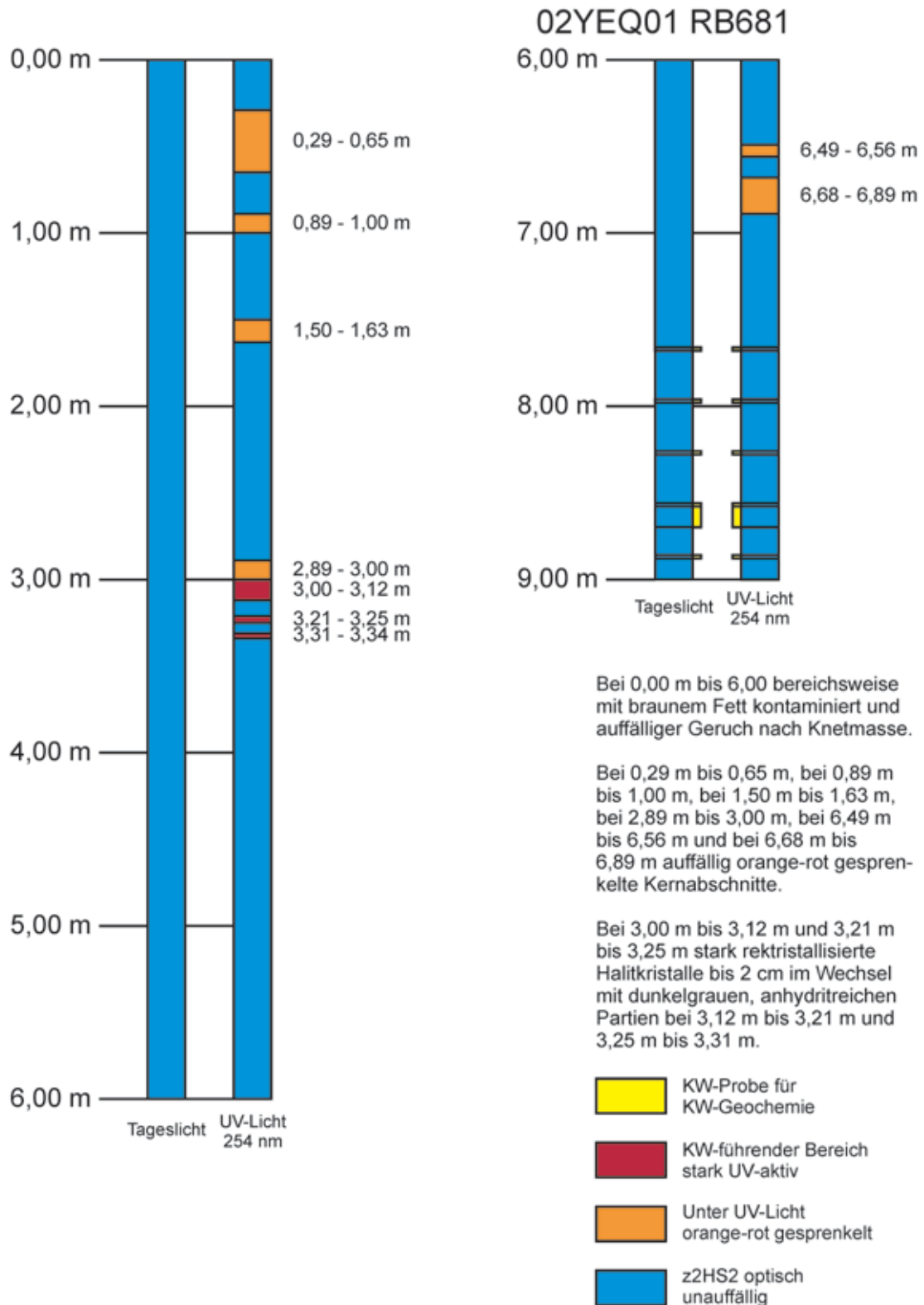
Anhang 18:

KW-Profil RB680



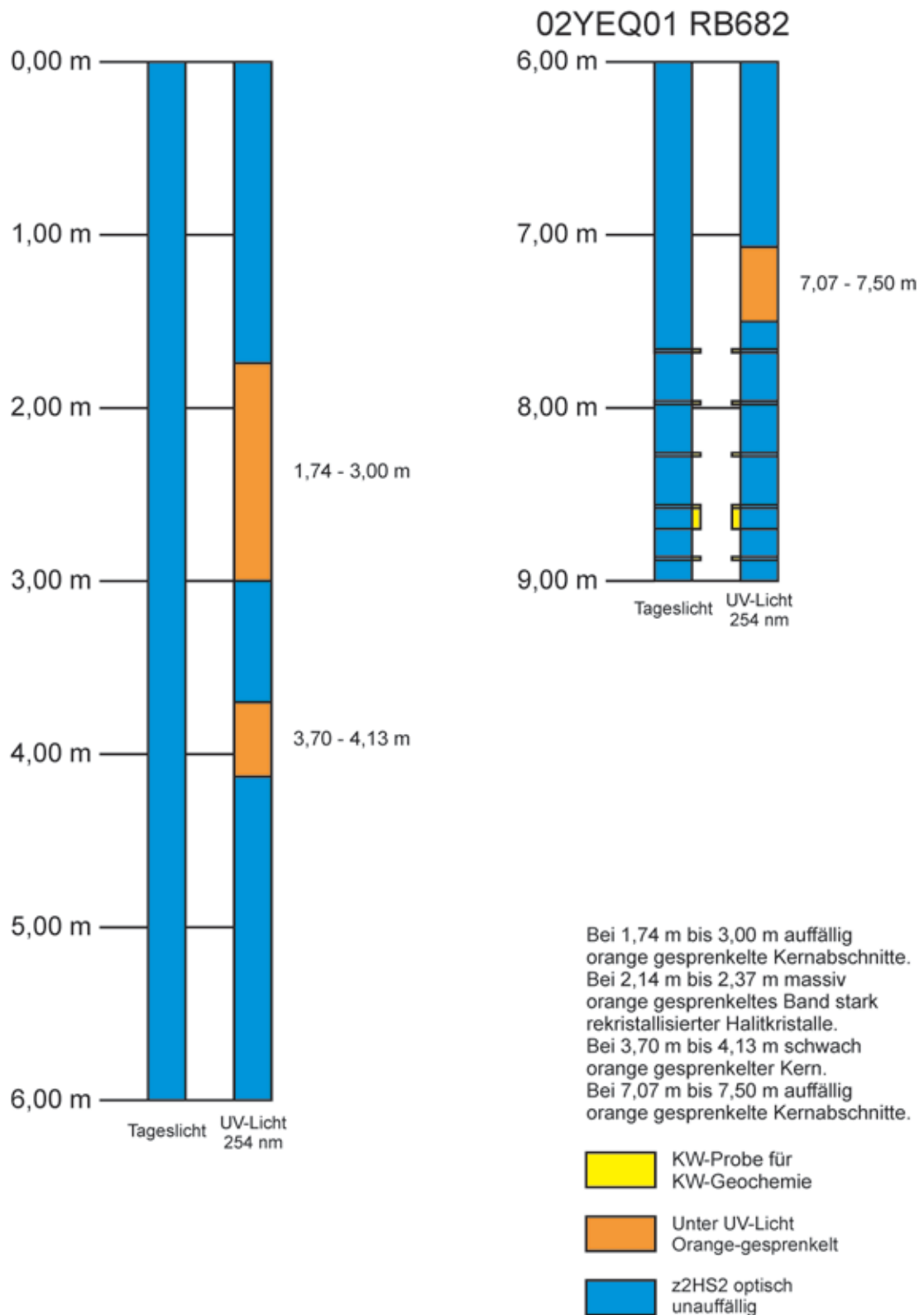
Anhang 19:

KW-Profil RB681



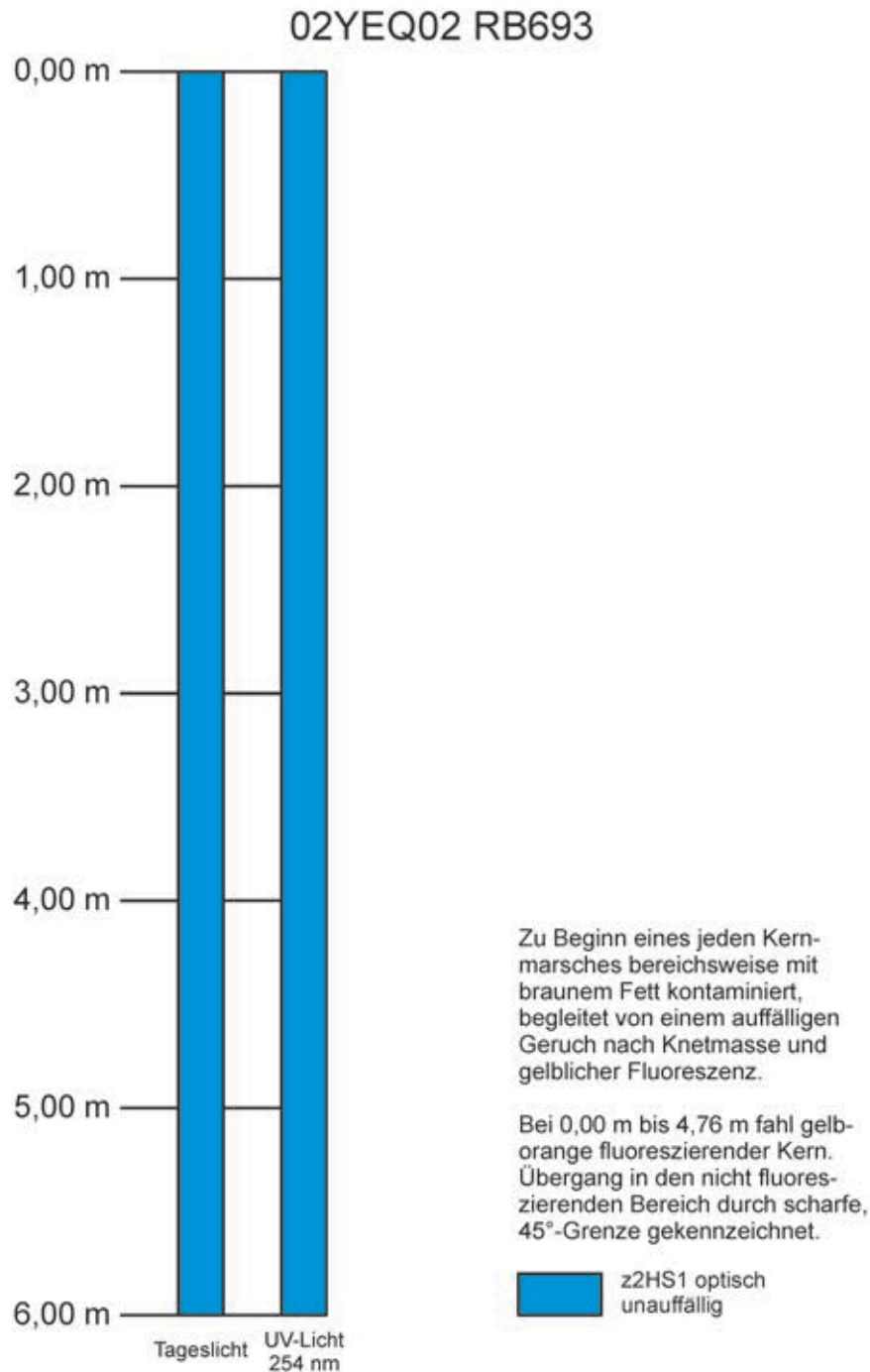
Anhang 20:

KW-Profil RB682



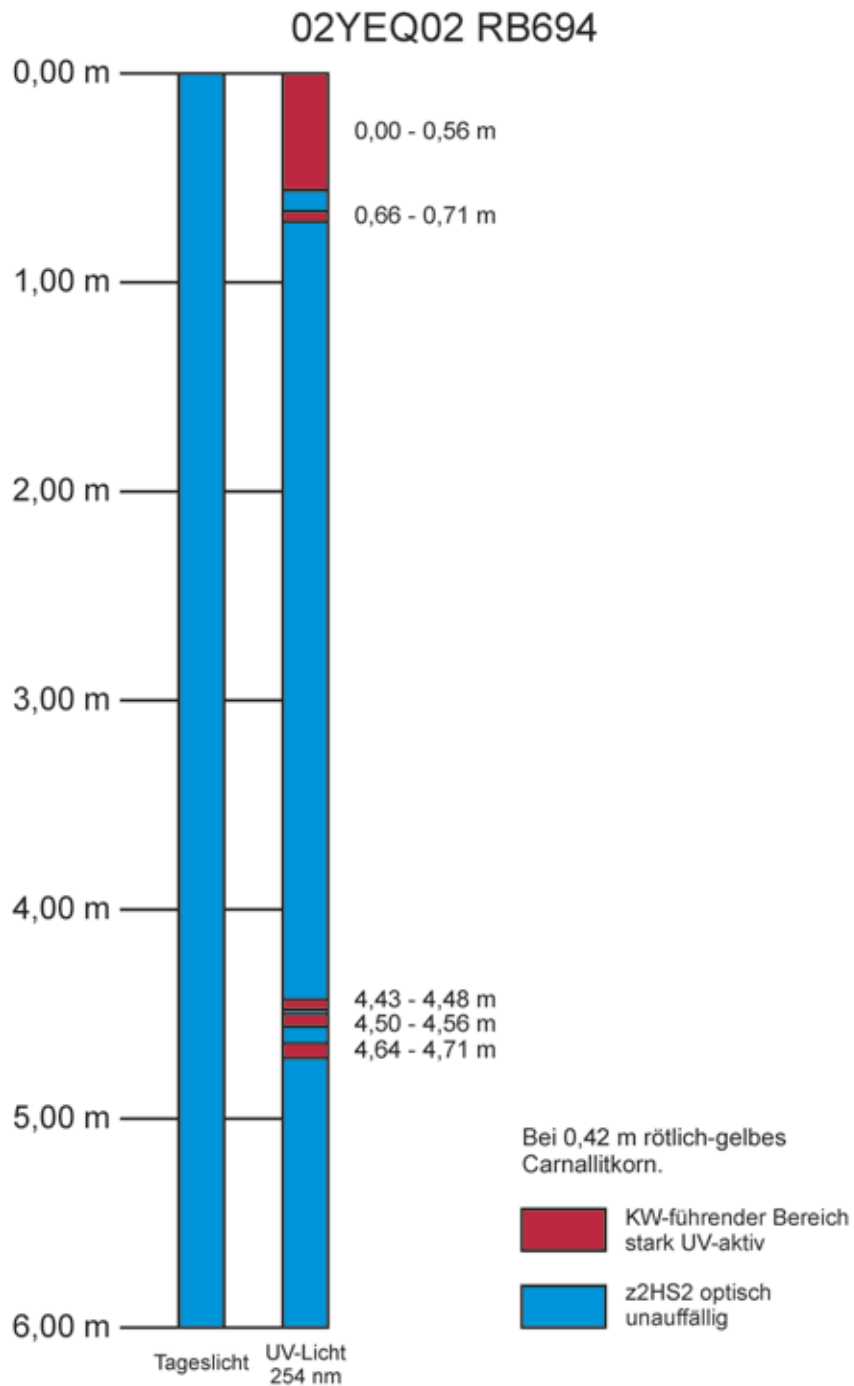
Anhang 21:

KW-Profil Packerbohrung RB693



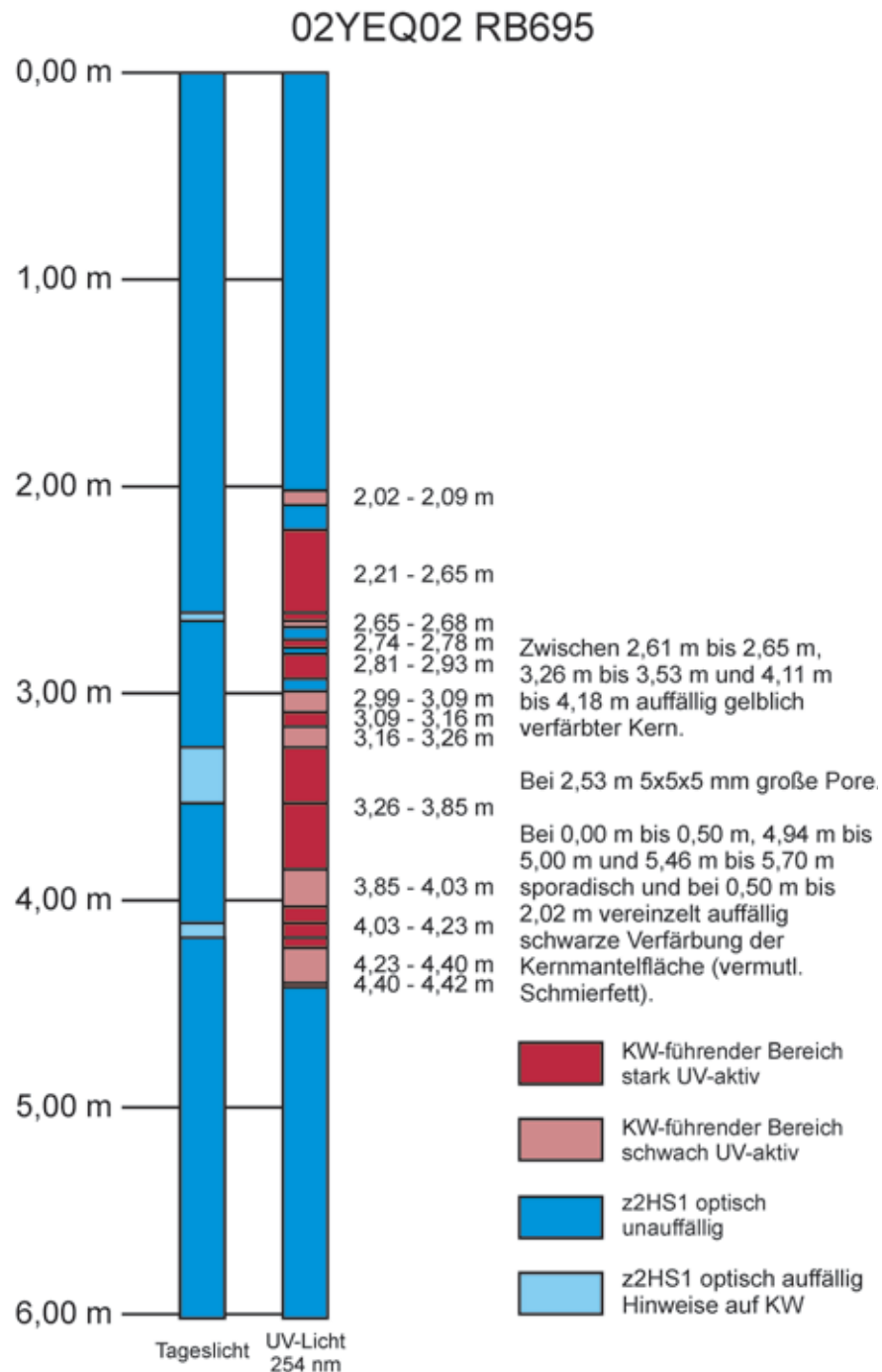
Anhang 22:

KW-Profil Packerbohrung RB694



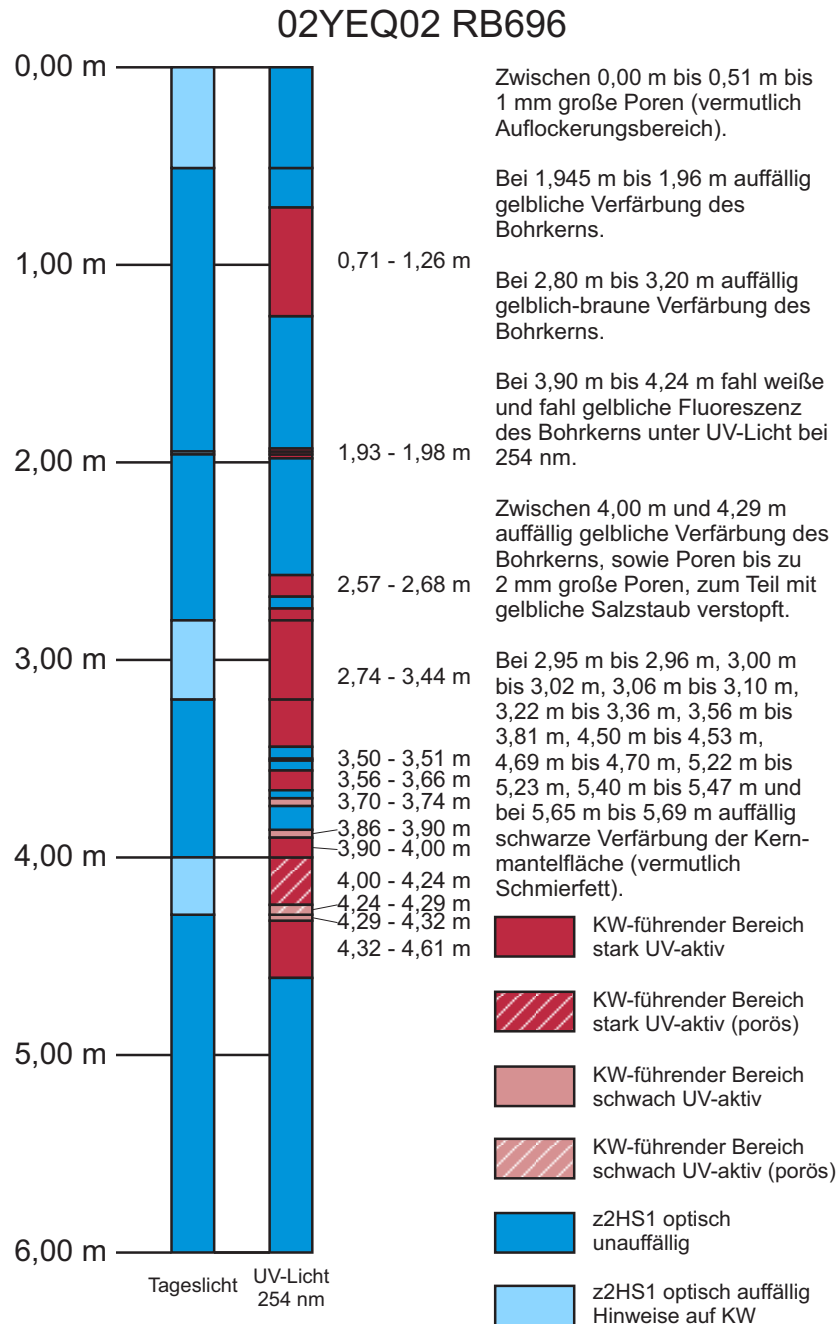
Anhang 23:

KW-Profil Packerbohrung RB695



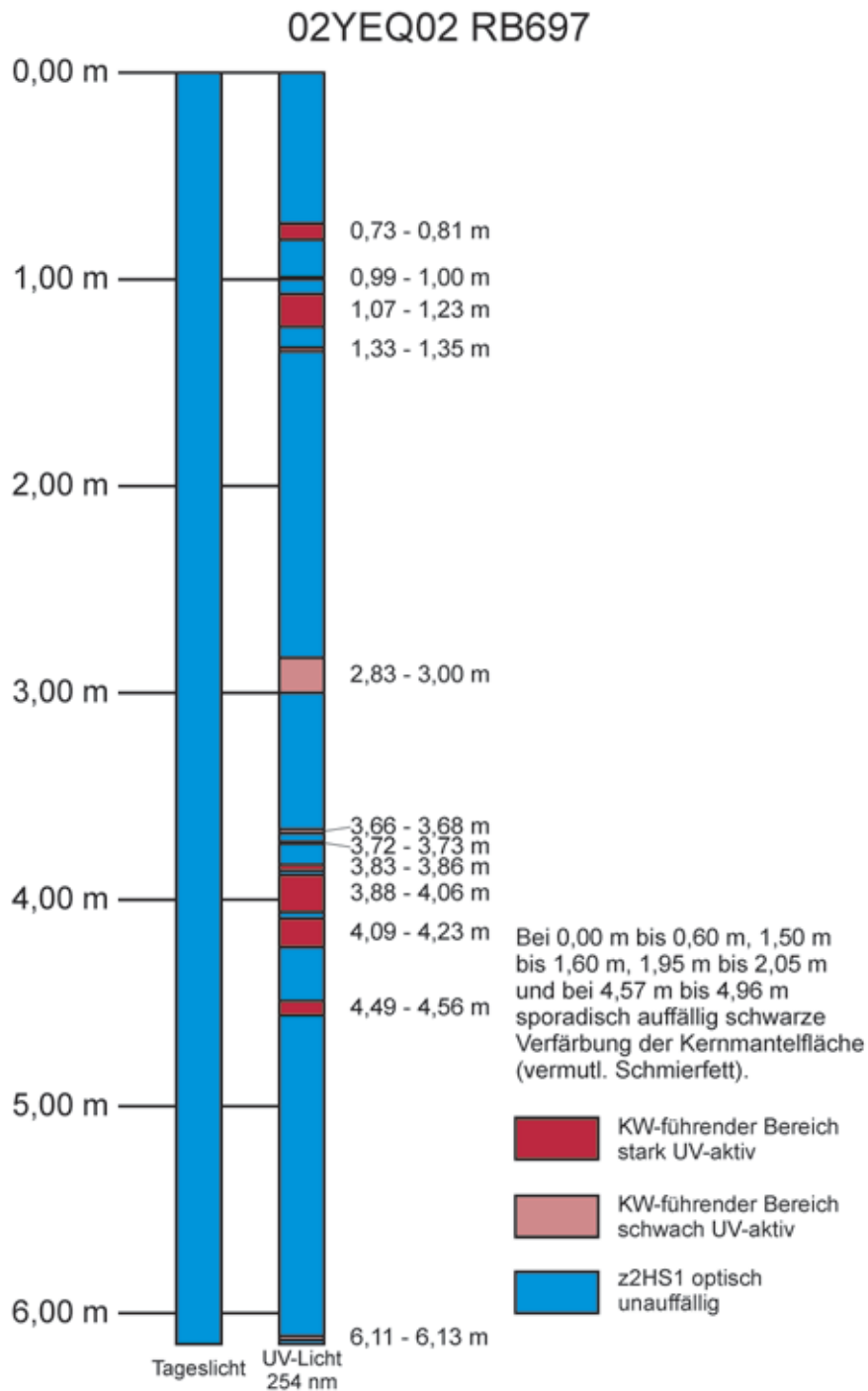
Anhang 24:

KW-Profil Packerbohrung RB696



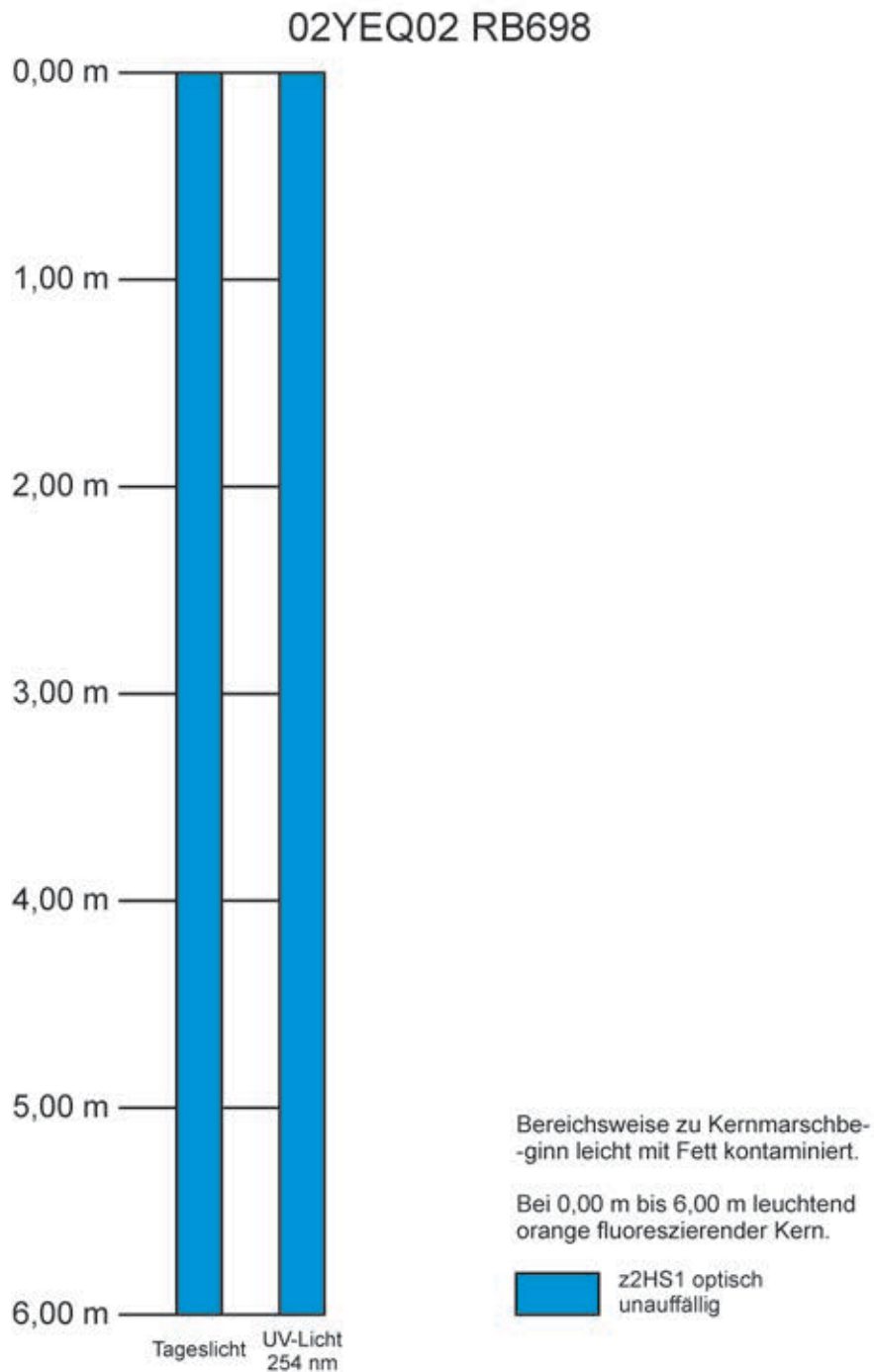
Anhang 25:

KW-Profil Packerbohrung RB697



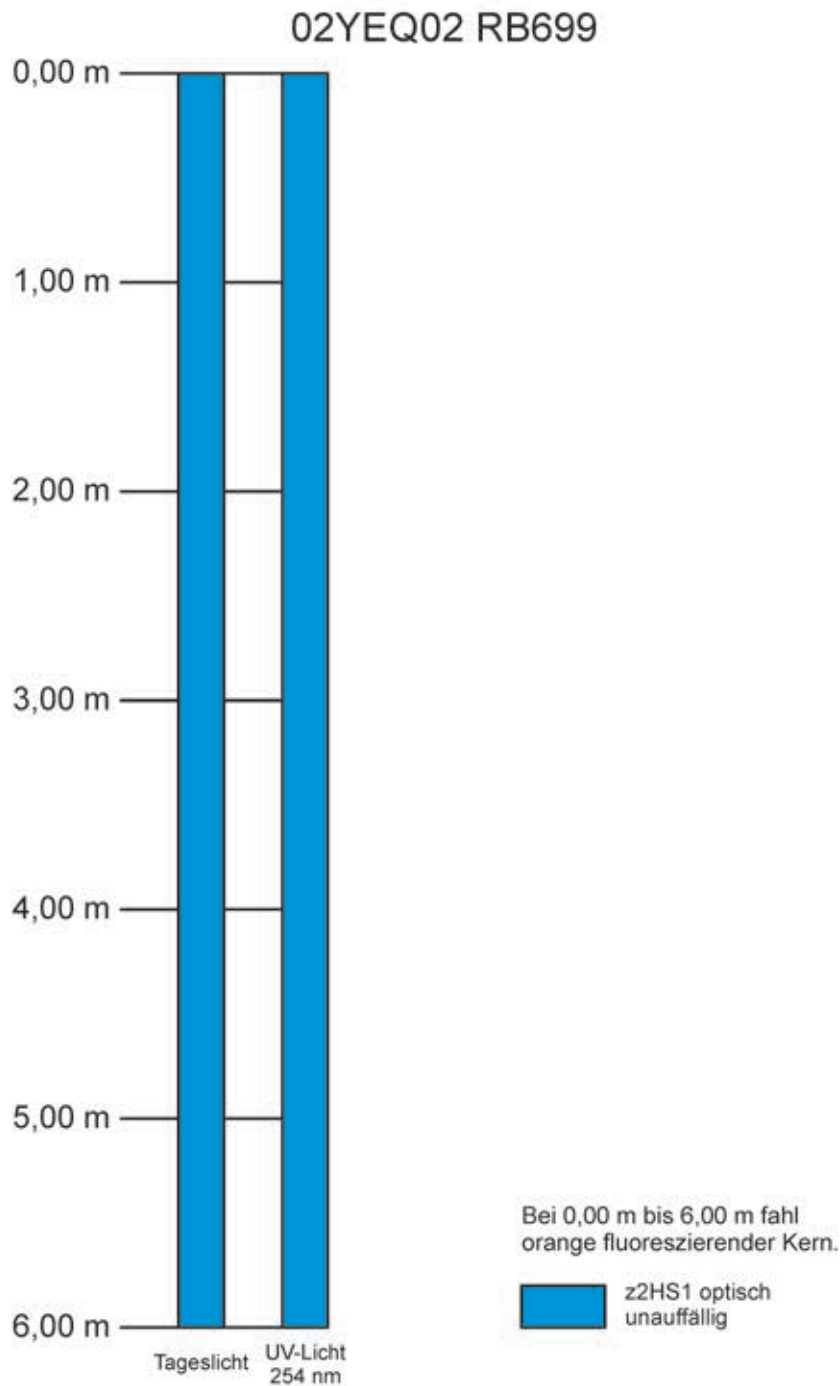
Anhang 26:

KW-Profil Packerbohrung RB698



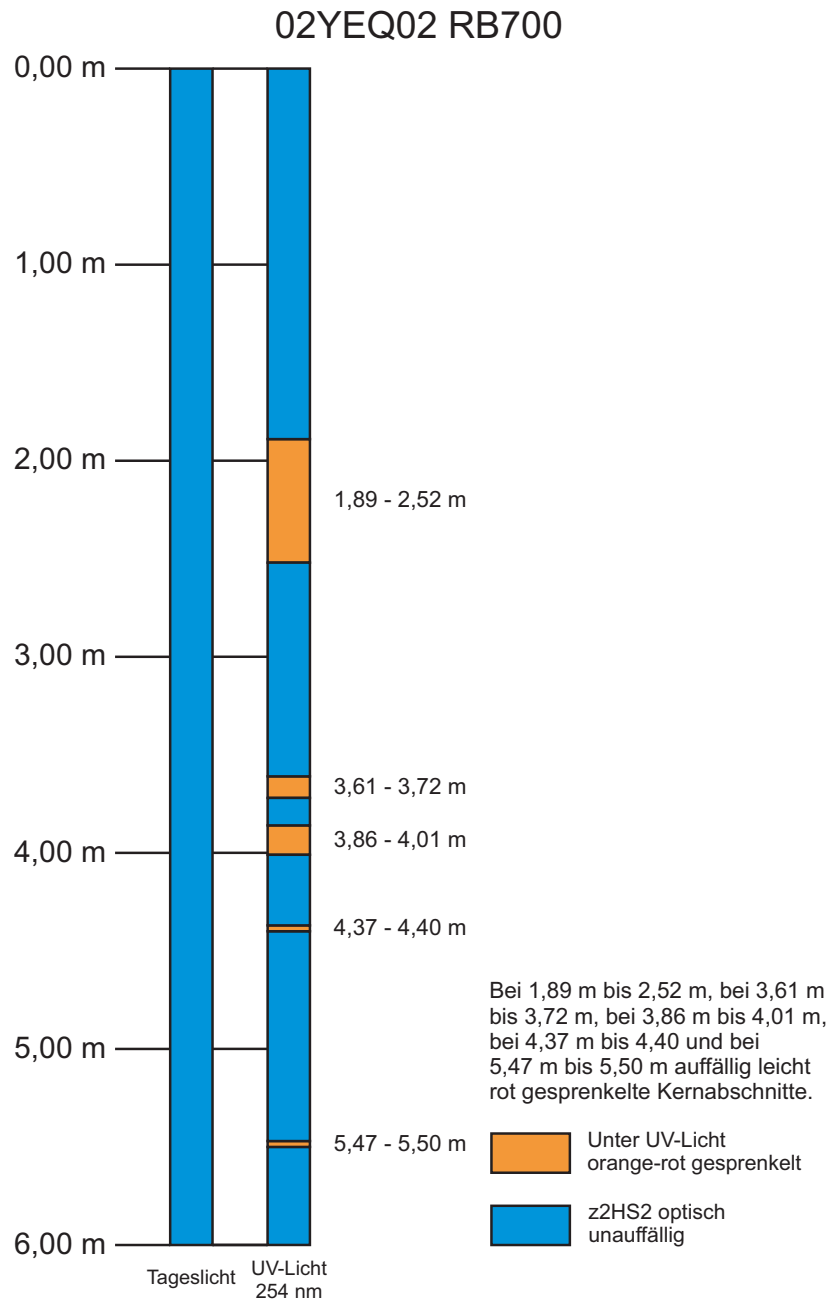
Anhang 27:

KW-Profil Packerbohrung RB699



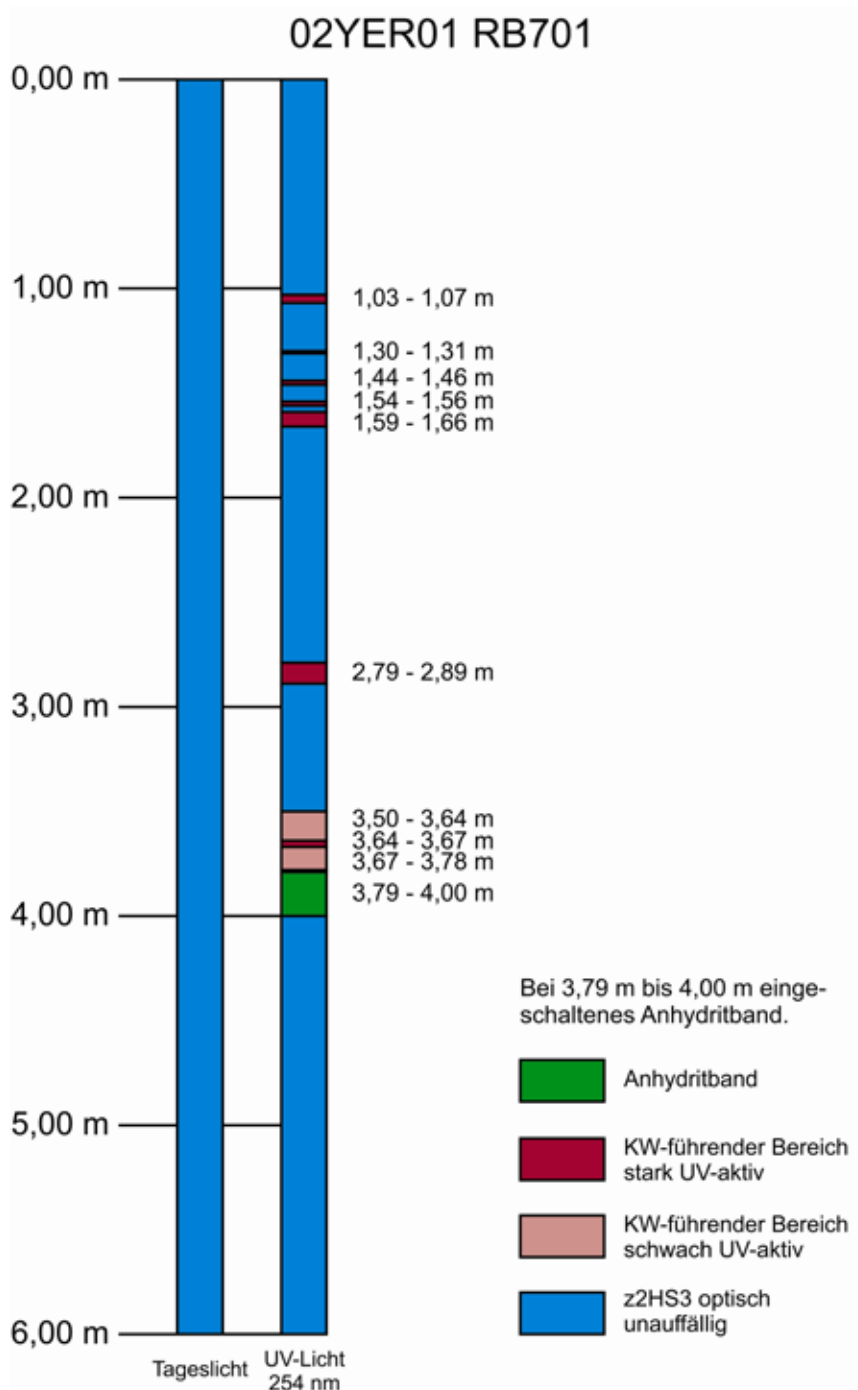
Anhang 28:

KW-Profil Packerbohrung RB700



Anhang 29:

KW-Profil Packerbohrung RB701



Anhang 30:

KW-Profil Packerbohrung RB702

