

Deckblatt



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 1
9A	55211000				H	RB	0017	00	Stand: 30.06.2025

Titel der Unterlage:

Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Ersteller/Unterschrift:

TEK-GW 2/1

Prüfer/Unterschrift:

Stempelfeld:

UVST:	bergrechtlich verantwortliche Person:	atomrechtlich verantwortliche Person:	Bereichsleitung:	Freigabe zur Anwendung:
25. IIII 2025	30. IIII 2025	30. IIII 2025	30. IIII 2025	30. IIII 2025
Datum und Unterschrift				

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der BGE.

Revisionsblatt



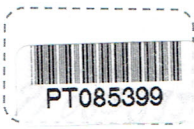
**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 2a Stand: 30.06.2025
N A A N	N N N N N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	A A A A	A A	N N N N	N N	
9A	55211000				H	RB	0017	00	

Titel der Unterlage:
Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwortl. Stelle	revidierte Blätter	Kat.*	Erläuterung der Revision
00	30.06.2025	TEK-GW.2			Ersterstellung

*
 Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden



Stand: 30.06.2025

Blatt: 1

DECKBLATT

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Kurztitel der Unterlage:

Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Ersteller / Unterschrift:

TEK-GW.2/1,

Prüfer / Unterschrift:

Titel der Unterlage:

Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Freigabevermerk:

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	
917	55211000			
Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	H	RB	0017	00

Freigabedurchlauf

Fachbereich:

Stabsstelle Qualitätssicherung:

Endfreigabe:

Datum: 25. JULI 2025

Datum: 30. JULI 2025

Unterschrift

Unterschrift

Na

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 3

Inhaltsverzeichnis	Blatt
1 Hintergrund und Veranlassung	10
2 Begriffe und Abkürzungen	10
3 Projektbeschreibung	13
3.1 Erkundungsziele und Aufgabenstellung	13
3.2 Angaben zur Bohrung	14
3.3 Projektbeteiligte	16
3.4 Genehmigungen	18
3.5 Projektablauf	18
3.6 Geologische Ausgangssituation	22
4 Ergebnisse geowissenschaftliches Erkundungs- und Untersuchungsprogramm	23
4.1 Geologische Aufnahme Bohrplatz	24
4.2 Geologische Aufnahme Bohrkerne	26
4.2.1 Zweck und Methodik	26
4.2.2 Geologische Beschreibung Deckgebirge und Residual	27
4.2.3 Geologische Beschreibung Salinar	30
4.2.4 Vorläufige stratigraphische Einordnung	32
4.3 Geophysikalische Bohrlochmessungen	34
4.3.1 Messprogramm und Messziele	35
4.3.2 Geowissenschaftliche Bohrlochmessungen	42
4.3.3 EMR-Messungen	55
4.3.4 Bohrlochseismik	57
4.4 Hydrogeologische Packertests	59
4.4.1 Messprogramm und Messdurchführung	59
4.4.2 Ergebnisse	61
4.5 Spannungsmessungen	68
4.5.1 Messprogramm und Messdurchführung	68
4.5.2 Ergebnisse im Deckgebirge	69
4.5.3 Ergebnisse im Salinar	73
4.6 Dilatometertests	77
4.6.1 Messprogramm und Messdurchführung	77
4.6.2 Ergebnisse	78
4.7 Geologische Labor-/Bohrkernuntersuchungen	81

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 4

4.7.1	Geochemische Analysen	81
4.7.2	Hydrochemische Analysen	84
4.7.3	Palynologische Untersuchungen	101
4.8	Gesteinsmechanische Untersuchungen	102
4.8.1	Messprogramm und Messdurchführung	102
4.8.2	Ergebnisse	104
4.9	Spülungsverluste und Spülungsspiegel	109
4.10	Sorptionsanalysen	110
5	Integrative Auswertung	112
5.1	Geologische Abfolge/Aufbau	112
5.2	Strukturgeologische Situation	118
5.2.1	Deckgebirge	118
5.2.2	Residualbereich	121
5.2.3	Salinar	121
5.3	Hydrogeologische Situation	124
5.3.1	Hydrostratigraphische Gliederung	124
5.3.2	Grundwasseralter	131
5.3.3	Hydraulisch Durchlässige Struktur im Residual	132
5.4	Gebirgsmechanische Situation	133
5.4.1	Verformungsverhalten	133
5.4.2	Gebirgsspannungen	138
6	Zusammenfassung	138
7	Literaturverzeichnis	139

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 5

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1: Analyseergebnisse Grundwasseranalysen	143
Anhang 1.1: Uraninanalyse Spülprobe S0	143
Anhang 1.2: Uraninanalysen vor und im Intervall i2	145
Anhang 1.3: Vollanalyse GW-Probe i2	147
Anhang 1.4: Uraninanalysen in den Intervallen i4 und i5b	154
Anhang 1.5: Vollanalyse GW-Probe i4 und i5b	156
Anhang 1.6: Isotopenanalysen GW-Probe i4 und i5b	163
Anhang 2: Stratigraphischer Untersuchungsbericht zur Bohrung Remlingen-18	167

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eckdaten Bohrung R18.....	15
Tabelle 2: Auftragnehmer im Rahmen der Erkundungsbohrung R18.....	17
Tabelle 3: Zusammenstellung der bergrechtlichen Genehmigungen für die Erkundungsbohrung R18.	18
Tabelle 4: Abfolge der Arbeiten in der Bohrlöcherstellung und Bohrlochvermessung.	19
Tabelle 5: Prognostiziertes Vorprofil der Erkundungsbohrung R18.....	22
Tabelle 6: Vorläufige lithostratigraphische Gliederung R18 (1.) basierend auf feldgeologischer Aufnahme [2] und anschließenden Bohrkernbegehungen.	32
Tabelle 7: Vorläufige lithostratigraphische Gliederung R18 (2.) basierend auf feldgeologischer Aufnahme [2] und anschließenden Bohrkernbegehungen.	33
Tabelle 8: Zusammenstellung der in der R18 durchgeführten geophysikalischen Bohrlochmessungen und deren jeweilige Messziele.	35
Tabelle 9: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (1.) im 1. Bohrabschnitt.....	37
Tabelle 10: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (1.) im 2. Bohrabschnitt.....	38
Tabelle 11: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (1.) im 3. Bohrabschnitt.....	39
Tabelle 12: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (2.) im 3. Bohrabschnitt.....	40
Tabelle 13: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (2.) im 4. Bohrabschnitt.....	41
Tabelle 14: Zusammenstellung Bereiche mit erweiterten Bohrlochdurchmessern und deren geologische Einordnung der möglichen Ursache(n).	44
Tabelle 15: Zusammenfassende Übersicht der im Deckgebirge anhand ABI-Auswertung beobachteten Schichteinfallrichtungen und -winkel.	52

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 6

Tabelle 16: Manuell am akustischen Bohrloch Televiever Log bestimmte Einfallrichtungen und Einfallswinkel der innerhalb des Zechsteinsalinar modellierten Schichtgrenzen und Schichtungen mit Teufen auf Grundlage ABI-Messung [13].	53
Tabelle 17: Zusammenfassung der mittels VSP anhand der Poissonzahl bzw. v_p/v_s -Verhältnis identifizieren Anomaliezonen im Deckgebirge.	59
Tabelle 18: Zusammenstellung der hydraulischen Packertests in der Erkundungsbohrung R18.	60
Tabelle 19: Dauer der Bohrlochdruckgeschichte in der Erkundungsbohrung R18.	60
Tabelle 20: Ergebnisse der Packertests in Intervall i1 und Intervall i2.	63
Tabelle 21: Ergebnisse der Packertests in Intervall i3 und Intervall i4.	65
Tabelle 22: Ergebnisse der Packertests in Intervall i5b und Intervall i6.	66
Tabelle 23: Zusammenstellung der in der Erkundungsbohrung R18 durchgeführten Spannungsmessungen und Abdruckpackertests mit geologischer Zuordnung des Testbereichs [17].	69
Tabelle 24: Ergebnisse der hydraulischen Spannungsmessungen in der Bohrung R18 im Bereich des mesozoischen Deckgebirges.	70
Tabelle 25: Ergebnisse der Spannungsfeldberechnungen für die verwendeten Messeinsätze im Deckgebirge der R18.	71
Tabelle 26: Ergebnisse der hydraulischen Spannungsmessungen in der Bohrung R18 im Zechsteinsalinar.	74
Tabelle 27: Ergebnisse der Spannungsfeldberechnung für die Messeinsätze im Zechsteinsalinar der Bohrung R18.	75
Tabelle 28: Zusammenstellung der in der Erkundungsbohrung R18 durchgeführten Dilatometertests.	78
Tabelle 29: Klassifizierung der Ergebnisse der Dilatometertests in der Erkundungsbohrung R18 gemäß Abschlussbericht Dilatometertests [18].	80
Tabelle 30: Übersicht der zum Zwecke geochemischer und Isotopenuntersuchungen entnommener Proben von Bohrkernen der R18 (n.v. = nicht vergeben, Min = Mineralogie (XRD), GC = Geochemie (Nasschemische Analyse), Iso = Isotopenanalyse (S-SO ₄ , O-SO ₄ , Sr-Sr).	82
Tabelle 31: Übersicht der gewonnen Proben zur hydrochemischen Analyse in der Erkundungsbohrung R18. Die durchgeführten Vollanalysen sind in blauer Farbe hinterlegt.	85
Tabelle 32: Vor Ort erfasste physikochemische Parameter sowie die im Labor analysierte Uraninkonzentration im Intervall i2.	87
Tabelle 33: Vor Ort erfasste physikochemische Parameter sowie die im Labor analysierte Uraninkonzentration im Intervall i5b.	89
Tabelle 34: Vor Ort erfasste physikochemische Parameter sowie die im Labor analysierte Uraninkonzentration im Intervall i4.	90

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 7

Tabelle 35: Ergebnisse der hydrochemischen Analysen. Grau hinterlegte Parameter wurden auf Basis der vorliegenden Analyse errechnet.	91
Tabelle 36: Wasserstoff- und Heliumisotope.	97
Tabelle 37: Analyseergebnisse der Kohlenstoffisotope C-13 und C-14.	99
Tabelle 38: Ergebnisse der palynologischen Untersuchungen auf Basis der Auswertung der Pollenanalysen in Gegenüberstellung der vorläufigen stratigraphischen Einordnung (vgl. Kapitel 4.2.4).	101
Tabelle 39: Übersicht der definierten Lithotypen (SU2 nicht untersucht).....	104
Tabelle 40: Zusammenfassung der für die jeweiligen Lithotypen ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten und elastischen Elastizitätsmoduln.....	106
Tabelle 41: Zusammenfassung der für die jeweiligen Lithotypen ermittelten triaxialen Druckfestigkeiten (Einstufen-Versuch) und elastischen Elastizitätsmoduln.	107
Tabelle 42: Zusammenfassung der für die jeweiligen Lithotypen ermittelten triaxialen Druckfestigkeiten (Mehrstufen-Versuch) und elastischen Elastizitätsmoduli.....	108
Tabelle 43: Zusammenfassung der für die jeweiligen Lithotypen mittels indirekten bzw. direkten Zugversuchen ermittelten Zugfestigkeiten.	109
Tabelle 44: Am Bohrkern der R18 entnommene Proben zur Sorptionsanalyse durch das KIT-INE.	111
Tabelle 45: Abschließende lithostratigraphische Gliederung R18 (1.) / Deckgebirge mit Residual und Übergang ins Zechsteinsalinar	115
Tabelle 46: Abschließende lithostratigraphische Gliederung R18 (2.) / Zechsteinsalinar	116
Tabelle 47: Hydrostratigraphische Gliederung nach [52] der durch die Erkundungsbohrung R18 aufgeschlossenen Formationen im Deckgebirge; alle Teufenangaben beziehen sich auf Messungen in der R18 (1.).....	124
Tabelle 48: Gegenüberstellung der Verformbarkeit gem. Dilatometertests und anhand der Bohrlochseismik identifizierter Anomaliezonen.....	134
Tabelle 49: Beschreibung und Diskussion der Gegebenheiten für die mittels Dilatometertests ermittelten Ergebnisse und Teufenbereiche moderater bis sehr starker Verformbarkeit.	135
Tabelle 50: Zusammenfassung der in den gesteinsmechanischen Untersuchungen für die jeweiligen Lithotypen ermittelten Festigkeitskennwerte sowie der Kennwerte für Abrasivität und Veränderlichkeit.....	137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geologisches Profil des Anschnitts (westlicher Teil) an der Südseite des im Bau befindlichen Bohrplatzes (Blick nach Süden).	25
Abbildung 2: Geologisches Profil des Anschnitts (mittlerer Teil) Grenzbereich Röt/Muschelkalk (Blick nach Süden).....	25

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 8

Abbildung 3: Lithologisches Profil der im Deckgebirge durchteufen Schichtenfolge – entspricht den Bohrabschnitten der R18 (1.).....	29
Abbildung 4: Lithologisches Profil der im Deckgebirge durchteufen Schichtenfolge – entspricht dem Bohrabschnitt der R18 (2.); Legende siehe Abbildung 3.	31
Abbildung 5: Markscheiderische Nachberechnung Bohrlochmessung DMT (Run 3 und 4, Messung 15.05.2024).	43
Abbildung 6: Bearbeitetes Radargramm des Dipol der 50 MHz Sonde bis 2000 ns.....	56
Abbildung 7: Radargramm des Dipol der 250 MHz Sonde bis 2000 ns ohne Unterdrückung der Störwellen.	56
Abbildung 8: Bearbeitetes Radargramm des Dipol der 250 MHz Sonde bis 2000 ns.....	57
Abbildung 9: VSP Daten für die Komponenten, von links nach rechts: Hydrophon, Vertikal, X, Y mit überlagerten Ersteinsätzen für die P-Welle (blau) und S-Welle (rot).....	58
Abbildung 10: Grafische Übersicht der ermittelten hydraulischen Durchlässigkeit in den Testintervallen i1-i6.	67
Abbildung 11: Grafische Übersicht der ermittelten Transmissivität in den Testintervallen i1-i6.	67
Abbildung 12: Grafische Übersicht der ermittelten Süßwasserdruckspiegelhöhen in den Testintervallen i1-i6.	68
Abbildung 13: Berechnetes Spannungsfeld im Deckgebirgsbereich der Erkundungsbohrung R18, aus [17] (S_v = Vertikalspannung, S_H = größere horizontale Hauptspannung; S_h = kleinere horizontale Hauptspannung; θ_{SH} : Streichrichtung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H).	72
Abbildung 14: Berechnetes Spannungsfeld im Salinar der Erkundungsbohrung R18, aus [17] (S_v = Vertikalspannung, S_{min} = entspricht minimale Hauptspannung; θ_{SH} : Streichrichtung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H).	76
Abbildung 15: Zusammenfassung der gemessenen Entlastungsmodule nach Wegaufnahme und harmonischem Mittel und Erstbelastungsmodul mit harmonischem Mittel inkl. Stratigraphie der R18 (2.) nach [18].	81
Abbildung 16: Analyseergebnisse der Uraninkonzentration (Na-Fluorescein) und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (Vor-Ort-Parameter) im Intervall i2 der Erkundungsbohrung R18.	87
Abbildung 17: Analyseergebnisse der Uraninkonzentration (Na-Fluorescein) und der O_2 -Konzentration (Vor-Ort-Parameter) im Intervall i5b der Erkundungsbohrung R18.	88
Abbildung 18: Analyseergebnisse der Uraninkonzentration (Na-Fluorescein) und der O_2 -Konzentration (Vor-Ort-Parameter) im Intervall i4 der Erkundungsbohrung R18.	90
Abbildung 19: Piper-Diagramm der analysierten Wasserproben aus der Erkundungsbohrung Remlingen 18.....	94
Abbildung 20: δ^2H - $\delta^{18}O$ -Diagramm der Wasserproben aus der R18 und der R10. Dargestellt sind zudem die GMWL und die LMWL (Station Braunschweig).....	96
Abbildung 21: Darstellung der 3H- gegen die 4Herad-Konzentration in den Wasserproben der Erkundungsbohrung R18 (roter Kreis) im Vergleich zu den Wasserproben des Asse-Höhenzugs [34]. Die Punkte stellen die Wasserproben aus	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 9

Grundwassermessstellen, die Dreiecke Wasserproben aus Erkundungsbohrungen dar.	97
Abbildung 22: Darstellung des $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisses gegen den $^4\text{He}_{\text{rad}}$ -Gehalt für die analysierten Wasserproben der R18 im Vergleich mit dem Grundwasser im Gleichgewicht mit der Atmosphäre (ASW), sowie $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wertebereiche für Erdkruste und Erdmantel.	98
Abbildung 23: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{34}\text{S}$ -Diagramm der Wasserproben aus der R18; mit Wertebereichen für Norddeutschland nach Angaben in den GSF-Berichten [36], Basis: [37], [38] und [33]. ...	100
Abbildung 24: Grad der Veränderlichkeit der untersuchten Lithotypen (links) und Darstellung der Veränderlichkeit in Abhängigkeit der Teufe (rechts).	105
Abbildung 25: Abrasivitätsindex (CAI) der untersuchten Lithotypen (links) und Darstellung in Abhängigkeit der Teufe (rechts).	105
Abbildung 26: Darstellung der modellierten Flächen und Strukturelemente im Deckgebirge und Residualbereich. a: Profilschnitt durch die 3D Seismik (XL 1694) durch die Bohrung R18. Rote, gestrichelte Linien deuten vermutete Störungen an. Die grünen Striche an der Bohrspur sind Einfallswerte der Schichtung interpretiert auf Basis der ABI-Messungen. b: Perspektivansicht auf die Deckgebirgsschichten. Mit Ausnahme der Calvörde Fm. sind jeweils die Basisflächen dargestellt. c: Tiefenschnitt durch die 3D Seismik (490 m).....	120
Abbildung 27: Darstellung der modellierten Fläche des Intrasalinars: Roter Salzton (z4RT) und Anhydritmittelsalze (z3AM), jeweils Top und Basis. a: Profilschnitt durch die 3D Seismik im Bereich der R18. Die roten Striche entlang der Bohrspur zeigen das Schichteinfallen basierend auf ABI Daten. b: Perspektivansicht aus NE. c: Tiefenschnitt durch die 3D Seismik im Bereich des geplanten Rückholbergwerks (750 m unter GOK). Das blaue Quadrat zeigt das Detailmodellgebiet für die konkrete Schachtplanung. Gestrichelte, rote Linien deuten vermutete Störungen an.	123

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 10

1 Hintergrund und Veranlassung

Nach dem „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren“ (Atomgesetz; AtG) hat der Bund u. a. Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten. Im Rahmen eines Übereinkommens wurde am 04.09.2008 entschieden, dass die Schachtanlage Asse II verfahrenstechnisch wie ein Endlager für radioaktive Abfälle zu behandeln ist.

Zur Beurteilung der für die Schließung der Anlage möglichen Optionen führte das BfS als ehemaliger Betreiber der Schachtanlage Asse II einen Optionenvergleich durch. Nach dem 2010 veröffentlichten Ergebnis des Optionenvergleichs stellt die Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachtanlage Asse II die bestmögliche Stilllegungsoption dar. Die vor der Stilllegung der Schachtanlage Asse II durchzuführende Rückholung der radioaktiven Abfälle wurde 2013 durch Einfügen des § 57b in das AtG („Lex Asse“) gesetzlich verankert.

Um die Rückholung aller Gebinde durch die bestehenden Randbedingungen der Schachtanlage möglichst schnell ausführen zu können, ist der Bau eines weiteren Tagesschachtes (Schacht Asse 5) sowie die Auffahrung neuer Grubenräume (Rückholbergwerk) östlich des Bestandsbergwerks erforderlich. Grundlage hierfür bilden umfangreiche über- und untertägige Erkundungsmaßnahmen und die integrative Betrachtung sämtlicher in diesem Bereich gewonnener Daten und Erkenntnisse.

Im vorliegenden Bericht werden die gewonnenen geologischen, geophysikalischen, geotechnischen und hydrogeologischen Informationen fokussiert für den ausgewählten Standort der Bohrung Remlingen 18 zusammengefasst. Eine daraus abzuleitende Bewertung hinsichtlich einer Eignung als Schachtstandort ist nicht Gegenstand dieses Berichtes.

2 Begriffe und Abkürzungen

ABI	Akustischer Bohrlochscanner
AG	Auftraggeber
API	American Petroleum Institute
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
ATV	Akustischer TelevIEWer
BA Nr.	Bohrlochabschnitt der angegebenen Nummer
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
BHC	Borehole Compensated
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 11

BOP	Blow Out Preventer
CAI	Cerchar-Abrasivitätsindex
CAL	Kaliber Log
CBL	Cement Bond Log
CH	Cased Hole (verrohrtes Bohrloch)
DIC	Dissolved Inorganic Carbon
DIL	Dual Induction Log
DOC	Dissolved Organic Carbon
EMR	Elektromagnetische Reflexionsmessung
EMS	Electronic Multishot (Bohrlochmessung)
FIT	Formation Integrity Test (Formations-Integritätstest)
GG	Gamma-Gamma
GK	Gauß-Krüger
GMWL	Global Meteoric Water Line
GOK	Geländeoberkante
GR	Gamma Ray
GRC	Gamma Ray corrected (korrigierte Gamma Ray Daten)
GSS	Gas Schutz Service
GW	Grundwasser
H-Wert	Hochwert (Teil der Koordinatenangabe)
KIT-INE	Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung
kN	Kilo-Newton
KT	Kalendertage

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 12

KZL	Kennzeichnungsleiste
lb	Amerikanisches Pfund
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
lpm	Liter pro Minute
LMWL	Lokale meteorische Wasserlinie
LS	Lagestatus
MBP	Messbezugspunkt
MD	Measured Depth (gemessene Teufe)
NMR	Kernspinresonanzspektroskopie
PEF	Photoelektrischer Effekt
PHIE	Berechnete effektive Porosität
PT	Packertest
ROP	Rate of Penetration (Bohrfortschritt in m/h)
RES	Resistivity (Widerstandsmessung)
RILDC	Compensated deep reading resistivity
RILMC	Compensated medium reading resistivity
SAL	Salinity (Leitfähigkeit)-Log
SBPL	Sonderbetriebsplan
SGR	Spektral-Gamma-Log
SP	Spontaneous Potential
SZ	Spaltzugversuch
TCC	Triaxiale (Druck-) Kriechversuche
TCMRT	Temperatur-, Spülungswiderstand-, Kabelkopfspeisungssonde

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 13

TCMS	Triaxiale Mehrstufendruckversuche
TCS	Triaxiale Druckversuche
TDC	Total Dissolved Carbon
TEMP	Temperatur-Log
TVD	true vertical depth (Wahre Vertikale Teufe)
UAN	Unterauftragnehmer
UCS	Uniaxiale Druckversuche
UGS	Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH
Uranin	Umgangssprachliche Bezeichnung des Tracers Na-Fluorescein
VSP	Vertical Seismic Profile
WBM	Water Based Mud (Bohrspülung auf Wasserbasis)
WL	Wireline
GG	Gamma-Gamma/Density-Log
XDA	Cross Dipole Acoustic
XRD	Röntgen-Diffraktometrie

3 Projektbeschreibung

3.1 Erkundungsziele und Aufgabenstellung

Im Rahmen einer 2011 durchgeführten Ist-Analyse [1] wurden mit Blick auf die Anforderungen der Schachtplanung und die gegebenen Randbedingungen in der Umgebung der Schachtanlage Asse II zwei Flächen ausgewählt, die als Bereiche für einen Schachtansatzpunkt in Betracht kommen. Beide Flächen wurden anhand mehrerer Kriterien jeweils einzeln bewertet. Anhand des Bewertungssystems wurde der Bereich östlich des Bestandsbergwerks als Vorzugsvariante für den Schachtansatzpunkt identifiziert. Aufgrund der geringen Aufschlussdichte in diesem Bereich wurde zur Verifizierung der geologischen Situation ein Erkundungsprogramm festgelegt, das zunächst eine übertägige Vertikalbohrung am Schachtansatzpunkt und mehreren untertägigen Erkundungsbohrungen in dessen Richtung umfasst und iterativ fortgeschrieben wird.

Die zur Festlegung des geeigneten Schachtansatzpunktes sowie die im Weiteren zur Planung untertägiger Infrastrukturräume für das Rückholbergwerk seit 2012 durchgeführten über- und untertä-

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 14

gigen Erkundungsmaßnahmen konnten die seinerzeit für den Erkundungskorridor getroffenen Annahmen der Geologie und Stratigraphie nicht vollumfänglich bestätigen. Basierend auf diesen Ergebnissen und in Anlehnung an die vorangeschrittene Schacht- und Grubenraumplanung wurde der potenzielle Schachtansatzpunkt ausgehend von der Erkundungsbohrung Remlingen 15 (R15) ca. 150 m in nordöstliche Richtung verschoben.

Mittels einer weiteren Erkundungsbohrung, der Remlingen 18 (R18), wurde primär die Zielstellung verfolgt, belastbare geowissenschaftliche Aufschlussresultate entlang der geplanten Schachtachse im Deckgebirge wie auch im Salinar bis zu einer Teufe von 900 m zu erreichen, um

1. den gewählten Ansatzpunkt zu bestätigen,
2. die für die Planung und Dimensionierung eines möglichen Schachtes erforderlichen Kennwerte zu gewinnen und damit
3. den Anforderungen einer Schachtvorbohrung im Sinne der DIN 21500 zu genügen.

Im Weiteren dienen die Erkenntnisse entlang der Bohrspur und des ebenfalls mittels Bohrlochmessungen erkundeten schachtnahen Gebirgsbereichs in Verbindung mit den weiteren für den betreffenden Bereich vorliegenden Erkundungsergebnissen

- der Aktualisierung bzw. Verifizierung des geologischen Modells, welches wiederum die Grundlage für weitere fachspezifische Modellrechnungen bildet, sowie
- der Planung von Infrastrukturräumen und möglicher Schachtanschlussstrecken des Rückholbergwerkes.

Die Erkundungsziele sollten zum einen durch den bohrtechnischen Aufschluss und zum anderen durch geophysikalische, geotechnische und hydrologische Bohrlochmessungen aus dem anforderungsgerecht erstellten Bohrloch heraus sowie durch Untersuchungen an Bohrkernmaterial erreicht werden.

Neben einer angestrebten lückenlosen Kerngewinnung beinhaltet die Aufgabenstellung der Planung und Erstellung der Bohrung

- den Schutz des potenziellen Schacht-Standortes durch streng lotrechten Verlauf der Bohrung;
- die Einhaltung eines Sicherheitspfeilers von 20 m um die Bohrachse, insbesondere zur un-
tertägigen Erkundungsbohrung 700-1a (70YEZ00/RB425);
- der Verwendung von Bohrlochsicherheitseinrichtung gem. §21 BVOT, da mit Eintritt in das Zechsteinsalinar das Antreffen von gasführenden Bereichen nicht auszuschließen war;
- die Einhaltung der Neufassung der BVOT Niedersachsen vom 17.05.2022.

3.2 Angaben zur Bohrung

Die Erkundungsbohrung R18 liegt ca. 500 m östlich des Betriebsgeländes der Schachtanlage Asse II. Weitere Angaben zur Lage der Bohrung sowie die Plan-Koordinate des Bohransatzpunktes und die relevanten technischen Informationen sind in nachstehender Tabelle 1 dargestellt.

Aufgrund einer Abweichung des Bohrlochverlaufs von ca. 2,6 m zwischen vorlaufender Kernbohrung und nachfolgender Richt- bzw. Erweiterungsbohrung im 3. Bohrabschnitt bei etwa 480 m, musste aus der Richtbohrung erneut eine Kernbohrung angesetzt werden, um die Anforderungen

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 15

an den durchgehend lotrechten Verlauf zu erfüllen (siehe Kapitel 3.1). Aus Gründen der Dokumentation wurde die Bezeichnung der Bohrung in Remlingen 18 (1.) für den mit der ursprünglichen Kernbohrung erstellten Abschnitt bis 489,25 m vergeben. Die nach Rückverfüllung bei 226,9 m angesetzte Richtbohrung und die daraus neu erstellte Kernbohrung des 3. Abschnitts sowie der erbohrte 4. Abschnitt kennzeichnen die Bohrung als Remlingen 18 (2.). Mit der Trennung der Bohrungsbezeichnungen wird keine technische Unterteilung dargestellt. Vielmehr sollen die Unterschiede der geologischen Situation entlang der beiden Bohrspuren sowie die für einen definierten Teufenbereich entlang beider Bohrlochverläufe vorliegenden Bohrkerne und geophysikalischen Messungen zugeordnet werden (vgl. [2], [3]) sofern nicht für die Beschreibung oder Ergebnisdarstellung erforderlich wird im Folgenden zur Vereinfachung allgemein von Remlingen 18 bzw. R18 gesprochen.

Tabelle 1: Eckdaten Bohrung R18.

Bohrungsbezeichnung		Remlingen 18 (R18)
Bohrspuren		R18 (1.) – 0 – 489,25 m MD R18 (2.) – 0 – 900,00 m MD
Dokumentationskennzeichen BGE		R18 (1.): 00YYZZ06/RB733 R18 (2.): 00YYZZ06/RB912
LBEG Bohrungs-ID		3830GE0311
Bohrungszweck		Erkundungsbohrung
Bohransatzpunkt und Höhenangaben (Bezugssystem: GK 4 LS 200)	Rechtswert	4409676,6
	Hochwert	5777897,4
	Höhe GOK	Im Niveau von 197,9 m ü. NN
	Höhe Oberkante Bohrkellersohle	194,74 m ü. NN
Landepunkt R18 (1.) ¹⁾ (Bezugssystem: GK 4 LS 200)	Rechtswert	4409674,9
	Hochwert	5777895,7
	Höhe	-282 m NN
Landepunkt R18 (2.) ¹⁾ (Bezugssystem: GK 4 LS 200)	Rechtswert	4409676,8
	Hochwert	5777897,9
	Höhe	-702 m NN
Endteufe		900 m MD / 900 m TVD
Bundesland		Niedersachsen

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 16

Landkreis	Wolfenbüttel
Gemeinde	Remlingen
Gemarkung	Remlingen
Flur	7
Flurstück(e)	8, 7, 5/1
Bohrbeginn	18.10.2023
Bohrverfahren	Gerichtet, Rotary, Seilkernbohrung 5½ B mit 6 m Innenrohrlänge
Spülung	Ton-Wasser-Spülung mit Polymeren, hyper-saline Spülung (NaCl-Spülung), beschwerte Ölspülung (EMR-Messung)
Endteufe erreicht am	15.05.2024
Status	Endteufe, Teilrückverfüllt bis 401,5 m

¹⁾ markscheiderische Nachberechnung Gyro-Messung DMT 15.05.2024

Sämtliche Meterangaben in dem vorliegenden Bericht entsprechen i.d.R. Teufenangaben und beziehen sich, sofern nicht explizit anders angegeben, auf die Teufe entlang des Bohrpfad (measured depth, MD). Weiterhin sind sowohl die Bohrlochmessungen als auch die geologische Ansprache und lithostratigraphische Zuordnung auf GOK-Höhe (siehe Tabelle 1) eingehängt (GOK = 197,9 m NN = 0 m).

Zur Kontrolle und Nachweisführung, dass sich die in der Bohrung Remlingen 18 eingesetzte Bohrspülung nicht über Wegsamkeiten des Gebirges unkontrolliert ausbreitet, wurde Uranin als Tracer in die Spülung eingegeben. Uranin zeichnet sich durch Eigenschaften, wie eine sehr gute Nachweisgrenze und eine hohe Tracer-Rückgewinnungsrate, aus. Der Tracer wurde der Bohrspülung mit Beginn des zweiten Bohrabschnitts mit einer Konzentration von 1 ppm zugegeben.

Uranin ist aufgrund seiner hohen Nachweisempfindlichkeit, der geringen Sorptionsneigung und des guten Preis-Leistungsverhältnisses der am besten geeignete und auch am häufigsten eingesetzte Fluoreszenztracer. Uranin ist ein Na-Fluorescein und toxikologisch vollkommen unbedenklich. Wie einige andere Fluoreszenzfarbstoffe ist auch Uranin lichtempfindlich, was bei der Aufbewahrung und während der Probenahme beachtet werden muss. Durch Oxidationsmittel wie Chlor, Chlordioxid oder Ozon wird Uranin zerstört.

3.3 Projektbeteiligte

Die Projektorganisation für die Herrichtung des Bohrplatzes und die Erstellung der Bohrung ist im bohrtechnischen Abschlussbericht [3] zusammengefasst. Die an der Durchführung der Bohrarbeiten und Bohrlochmessungen sowie der Bohrkernuntersuchungen beteiligten Unternehmen /Auftragnehmer sind in nachfolgender Tabelle 2 zusammengestellt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 17

Tabelle 2: Auftragnehmer im Rahmen der Erkundungsbohrung R18.

Service	Firma
Schachtbautechnische Begleitung	Redpath Deilmann
Auftraggebervertretung	Untergrundspeicher- u. Geotechnologie Systeme GmbH (UGS)
Bohrunternehmen	Daldrup & Söhne AG
Unterauftragnehmer	
Spülungsservice	AW Drilling Services GmbH
Vertikal Bohrsystem	MICON GmbH
Bohrlochvermessung	BLM Gommern GmbH
Zementationsservice:	Fangmann Energy Service
Gasschutz	GSS Gasschutz Service
Casing-Run	General Tubing Service
Entsorgung	DEUSA International GmbH / Zimmermann GmbH & Co. KG/Plambeck Holding GmbH
Geologische Aufnahme	GeoService GmbH (Aurich)
Geophysikalische Bohrlochmessungen, einschließlich VSP und EMR	DMT GmbH & Co. KG
Zementkontrollmessungen	DMT GmbH & Co. KG
Hydrogeologische und geotechnische Messungen	Solexperts AG
Gesteinsmechanische Bohrkernuntersuchungen	Institut für Gebirgsmechanik Leipzig (IfG)

Des Weiteren wurde die BGE während der Erkundungsarbeiten fachlich durch die Firmen AFRY Schweiz AG und ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH unterstützt. Untersuchungen zur stratigraphischen Einordnung mittels Pollenanalyse wurden seitens des Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) durchgeführt. Weitere Analysen an Gesteinsmaterial für geologische, geochemische oder hydrogeologische Fragestellungen und hydrochemische Untersuchungen an wässrigen Lösungen, wurden, sofern extern vergeben, durch K-UTEC AG Salt Technologies (sowie deren Unterauftragnehmer), Eurofins und Hydroisotop GmbH durchgeführt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 18

Die Lagerung der Bohrkern der R18 erfolgt bei und durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover. Durch die BGR erfolgt darüber hinaus die detaillierte geologische Aufnahme der Bohrkern im Teufenbereich des Zechsteinsalinars. Weiterhin hat die BGR Schritte der Datenbearbeitung für die EMR-Auswertung übernommen.

3.4 Genehmigungen

Die für das Erstellen der Erkundungsbohrung einschließlich der Durchführung von Erkundungsmaßnahmen im Bohrloch erforderlichen bergrechtlichen Genehmigungen sind in der nachstehenden tabellarischen Übersicht (Tabelle 3) zusammengefasst.

Tabelle 3: Zusammenstellung der bergrechtlichen Genehmigungen für die Erkundungsbohrung R18.

Bezeichnung	Kurzbezeichnung	Genehmigung
Sonderbetriebsplan zur Errichtung Bohrplatz und Abteufen der Bohrung Remlingen 18 (08.03.2022, Rev00) mit Antrag auf Befreiung von der Landschaftsschutzgebiete-Verordnung [4]; Revision Unterlagen mit Planungsanpassungen der in Anspruch zu nehmenden Fläche (16.12.2022, Rev01) [5]	SBPL 01/2022	Zulassung LBEG, mit Schreiben vom 28.02.2023 [6]
1. Ergänzung zum Sonderbetriebsplan zur Errichtung Bohrplatz und Abteufen der Bohrung Remlingen 18: Durchführung von Walkaway-VSP-Messungen in der Bohrung Remlingen 18 sowie im Umkreis der Schachanlage Asse II (06.12.2023) [7]		Zulassung LBEG, mit Schreiben vom 28.05.2024 [8]
Sonderbetriebsplan für die Teil-Verfüllung der Erkundungsbohrung Remlingen 18 (20.11.2023) [9]	SBPL 05/2023	Zulassung LBEG, mit Schreiben vom 29.05.2024 [10]

3.5 Projektablauf

Im Folgenden sind die wesentlichen Informationen zum Projektablauf zusammengefasst (Tabelle 4). Weiterführende Angaben zum Ablauf der Bohrung bis Verfüllung sowie verschiedener technischer Angaben lassen sich [3] und [2] entnehmen.

Die Bohrung wurde in vier Abschnitten erstellt:

1. Bohrabschnitt: 15 m bis 85 m
2. Bohrabschnitt: 85 m bis 242 m
3. Bohrabschnitt: 242 m bis 489 m (R18 (1.) bzw. bis 525 m (R18 (2.)))
4. Bohrabschnitt: 489 m bis 900 m (Endteufe)

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 19

Tabelle 4: Abfolge der Arbeiten in der Bohrlocherstellung und Bohrlochvermessung.

Tätigkeit	Datum
Erstellung Bohrplatz mit geologischer Oberflächenkartierung inklusive Einbau 24" Hilfsstandrohr bis 15,5 m ab GOK	15.05.2023 – 01.11.2023
Einrichtung Bohranlage Wirth B4 Seilkernbohranlage durch Firma Daldrup & Söhne	09.10.2013
Einmessung Bezugspunkt 0 m (GOK) und Northing (Gitter Nord)	16.10.2023
Beginn Bohrarbeiten	18.10.2023
Bohren mit Seilkernverfahren, erster Abschnitt ab 15 m bis 85 m mit 6 3/8" Kernbohr garnitur Spülungsverluste ab 20,7 m	18.10.2023 – 24.10.2023
Durchführung Messprogramm (siehe Kapitel 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1)	25.10.2023 – 27.10.2023
Erster Abschnitt mit Zement verfüllt, anschließend überfahren mit 17 1/2" Vertikalbohr garnitur mit 22" Hole Opener	30.10.2023 – 11.11.2023
Geophysikalisches Messprogramm (siehe Kapitel 4.3.1)	11.11.2023
Einbau 18 5/8" Standrohr bis 81,8 m, Zementation Rohrtour 18 5/8" und Zementkontrollmessung, Aufbohren des Zementschuhs und Drucktest (FIT)	12.11.2023 – 17.11.2023
Bohren mit Seilkernverfahren, zweiter Abschnitt von 84,6 m bis 245 m mit 6 3/8" Kernbohr garnitur	17.11.2023 – 30.11.2023
Durchführung Messprogramm (siehe Kapitel 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1)	30.11.2023 – 08.12.2023
Rückzementation zweiter Abschnitt, anschließend überfahren mit 17 1/2" Vertikalbohr garnitur	09.12.2023 – 18.12.2023
Einbau 13 3/8" Schutzrohrtour bis 239 m, Zementation Rohrtour	19.12.2023 – 22.12.2023
Zementkontrollmessung, anschließend Aufbohren des Zementschuhs und FIT	03.01.2024
Bohren mit Seilkernverfahren, dritter Abschnitt von 245 m bis 462 m mit 6 3/8" Kernbohr garnitur	03.01.2024 – 18.01.2024

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 20

Tätigkeit	Datum
Unterbrechung wegen hoher Spülungsverluste	
Durchführung Messprogramm (siehe Kapitel 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1)	19.01.2024 – 28.01.2024
Bohren mit Seilkernverfahren, dritter Abschnitt von 462 m bis 483 m mit 6 3/8" Kernbohrgarnitur Kernbohren unter Spülungsverlusten	29.01.2024 – 02.02.2024
Durchführung Messprogramm (siehe Kapitel 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1)	04.02.2024 – 07.02.2024
Bohren mit Seilkernverfahren, dritter Abschnitt von 483 m bis 489,25 m mit 6 3/8" Kernbohrgarnitur Kernbohren unter Spülungsverlusten	09.02.2024
Durchführung Messprogramm (siehe Kapitel 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1)	10.02.2024
Aufgabe und Rückzementation erstes Bohrloch (R18 (1.)) bis 229 m (13 3/8" Rohrschuh)	11.02. – 17.02.2024
Überfahren/Neubohren des dritten Abschnitts mit 12 1/4" Vertikalgarnitur bis 486 m (Beginn R18 (2.)) Bohren unter Spülungsverlusten	17.02. – 11.03.2024
Kernmarsch bis 493 m, ohne Messprogramm. Anschließend Zementation des Kernlochs und Aufbohren mit 12 1/4" Bohrgarnitur	12.03. – 23.03.2024
Fortführung Kernbohren des dritten Abschnitts bis 524,9 m, anschließend Zementation des Kernlochs	23.03. – 28.03.2024
Aufweiten dritter Abschnitt mit 12 1/4" Rotary-Bohrgarnitur bis 525 m und Festlegen Verrohrungsteufe, Kalibermessung (6-Arm-CAL) durch DMT	29.03. – 04.04.2024
Einbau 9 5/8" Rohrtour, Positionierung Rohrschuh im Salinar, Zementation in zwei Stufen	05.04. - 09.04.2024
BOP auf 9 5/8" aufgeschweißt -> Ausrüsten der Bohranlage für Bohrlochdruckkontrolle und Gasschutz	10.04. - 14.04.2024
Aufbohren des Stage Tools, Gyro und CBL-Messung mit GR, TEMP (DMT), anschließend FIT	15.04.2024
Bohren mit Seilkernverfahren, vierter Abschnitt von 523 m bis 722 m mit 6 3/8" Kernbohrgarnitur, Einsatz gesättigte NaCl-Bohrspülung	24.04.2024

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 21

Tätigkeit	Datum
<ul style="list-style-type: none"> Zwischenzeitliche Bohrspurmessung Gyro (DMT) bei 610 m und 710 m Bei 722 m Unterbrechung der Bohrarbeiten wegen zu starken Neigungsaufbaus der Bohrspur, Vorziehen des Messprogramm 	
Durchführung Messprogramm (siehe Kapitel 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1)	25.04. – 30.04.2024
Bohrspurkorrektur vierter Abschnitt: <ul style="list-style-type: none"> Rückzementation offenes Loch bis 599 m Aufweitung offenes Loch von 525 m bis 598,3 m auf 8 ½" Bohren mit 8 ½" Vertikalbohrgarnitur bis 722 m Einbau Kernbohrgarnitur 	01.05. – 09.05.2024
Bohren mit Seilkernverfahren, vierter Abschnitt von 722 m bis 900 m mit 6 3/8" Kernbohrgarnitur Bei 780 m Messfahrt mit Gyro	09.05. – 15.05.2024
Durchführung Messprogramm (siehe Kapitel 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1)	15.05. – 23.05.2024
EMR (Bohrlochradar) <ul style="list-style-type: none"> Einzirkulieren OBM ins Bohrloch Einbau EMR-Sonde ohne Erfolg, Rücksendung der Sonde in den Workshop für technische Anpassungen Auszirkulieren OBM und Verwahrung auf Bohrplatz 	23.05. – 24.05.2024
VSP (Bohrlochseismik) (Messung nur bis 820 m bedingt durch Länge des WL-Kabels)	29.05. – 31.05.2024
Wiederholung EMR (Bohrlochradar) - Für diese Arbeit wurde erneut OBM ins Bohrloch einzirkuliert und nach Beendigung der Messung wieder auszirkuliert (Messung nur bis 800 m bedingt durch technische Restriktionen der Sonde im Bohrloch)	01.06. – 03.06.2024
Verfüllung Bohrloch mit Zement bis 401,5 m, Auffüllung mit Schutzflüssigkeit, übertägige Bohrlochsicherung mit Blindflansch und Manometer	04.06. – 08.06.2024
Übergabe geräumter Bohrplatz mit gesichertem Bohrkeller an BGE	20.06.2024

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 22
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

3.6 Geologische Ausgangssituation

Basierend auf der geologisch-strukturgeologischen Interpretation der Ergebnisse unterschiedlicher Erkundungskampagnen (3D-Seismik, über- und untertägige Bohrungen, untertägige Georadarmessungen) wurde im Rahmen der Planung der Bohr- und Testarbeiten für den ausgewählten Standort ein geologisches Vorprofil erstellt. Das geologische Vorprofil für die Erkundungsbohrung R18 ist in Tabelle 5 dargestellt.

Aufgrund der Unsicherheiten in der Datengrundlage und der geringen Aufschlussdichte war mit Abweichungen des Vorprofils zur realen Situation sowohl im Salinar als auch im Deckgebirge zu rechnen.

Tabelle 5: Prognostiziertes Vorprofil der Erkundungsbohrung R18.

	Teufe [m]		Stratigraphie		Petrographie	
	von	bis				
Deckgebirge	0	10	Quartär	q	Lehm, Löss, Mergel, Gips, Ton, Tonmergel, führt Kalkgerölle	
	10	240	Oberer Buntsandstein / Residual Rötanhydrit	so / R(so)	Schluffstein, Tonstein, vereinzelt Gips- und Anhydrit (v. a. zum Liegenden) lokal aufgelockert/gebräch	
			Störung			
	240	445	Unterer Buntsandstein	su / suC	Karbonat. Fansandstein, Kalksandstein, Schluffstein, Mergelstein, Tonmergelstein, Tonstein, vereinzelt gips- und anhydritführend lokal aufgelockert/gebräch	
	445	515	Residual Zechstein	R(z)	verschuppter Bereich aus Gips, Anhydrit, Ton/Tonstein, Fragmente Buntsandstein; gestörter Schichtverband	
Zechsteinsalinar	515	555	Tonmittelsalz	z3TM	Reine Steinsalzpartien im Wechsel mit tonig verunreinigten Steinsalzbereichen (Tonbrocken und -flocken)	
	555	565	Roter Salzton	z4RT	Sand- und tonhaltiger Schluffstein, führt häufig Anhydritknollen	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 23

Teufe [m]		Stratigraphie		Petrographie
von	bis			
565	570	Pegmatitanhydrit	z4PA	Anhydrit mit Halit als Zwickelfüllung, Tonlage an Basis ausgebildet
570	725	Aller-Folge	z4 (un-diff.)	Steinsalz (im stratigraphisch Hangenden ggf. auch Anhydrit, Tonstein, Mergelsteinbänke)
725	730	Pegmatitanhydrit	z4PA	Anhydrit mit Halit als Zwickelfüllung, Tonlage an Basis ausgebildet
730	740	Roter Salzton	z4RT	Sand- und tonhaltiger Schluffstein, führt häufig Anhydritknollen
740	840	Tonmittelsalz	z3TM	Reine Steinsalzpartien im Wechsel mit tonig verunreinigten Steinsalzbereichen (Tonbrocken und -flocken)
840	885	Schwadensalz	z3SS	Reine Steinsalzpartien im Wechsel mit anhydritisch-tonig verunreinigten Steinsalzbereichen
885	900 (ET)	Anhydritmittelsalz	z3AM	Steinsalz mit Anhydritmitteln, als Anhydritlagen bis -bänke, vereinzelt schwach kaliführend, potentiell lösungs- oder gasführend

4 Ergebnisse geowissenschaftliches Erkundungs- und Untersuchungsprogramm

Das geowissenschaftliche Erkundungs- und Untersuchungsprogramm war vornehmlich auf die schachtplanerischen Fragestellungen (siehe Kapitel 3.1) ausgerichtet und umfasste neben der geologischen Aufnahme der Aufschlussituation bei der Erstellung des Bohrplatzes (vgl. Kapitel 4.1) im Wesentlichen

- die lithologische Aufnahme der Bohrkerns und deren Fotodokumentation (vgl. Kapitel 4.2),
- geophysikalische Bohrlochmessungen (vgl. Kapitel 4.3) mit
 - geowissenschaftliche Bohrlochmessungen (vgl. Kapitel 4.3.2),
 - elektromagnetischen Reflexionsmessungen (vgl. Kapitel 4.3.3),
 - bohrlochseismischen Messungen (vgl. Kapitel 4.3.4),

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 24

- hydraulische Bohrlochmessungen wie
 - hydrogeologische Packertests (vgl. Kapitel 4.4)
 - Spannungsmessungen (vgl. Kapitel 4.5),
 - Dilatometertests (vgl. Kapitel 4.6),
- geologisch-geochemische Laboranalysen (vgl. Kapitel 4.7)
- geotechnische/gebirgsmechanische Laboruntersuchungen (vgl. Kapitel 4.8),
- langzeitsicherheitsrelevante Laboruntersuchungen (vgl. Kapitel 4.9).

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt jeweils eine kurze Darstellung der mit den jeweiligen Messungen verfolgten Mess- und Erkundungsziele sowie eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Ergänzend dazu liegen die Ergebnisse der einzelnen Methoden und Untersuchungen der Bohrlochmessungen in der R18 in eigenständigen Berichten vor [2], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18].

Es wird darauf hingewiesen, dass die feldgeologische Beschreibung und Dokumentation der Bohrkernkerne als Grundlage für die jeweiligen Berichte der verschiedenen Messfirmen und der dort gemachten Teufenangaben diene.

4.1 Geologische Aufnahme Bohrplatz

Im Rahmen der Erstellung des Bohrplatzes R18 wurde eine umfassende geologische Aufnahme des temporär aufgeschlossenen Gebirges entlang der Zuwegung zum Bohrplatz durchgeführt. Unter Berücksichtigung der im Vorfeld der Bauarbeiten durchgeführten Baugrunderkundungsbohrungen verfolgt die Aufnahme primär den Zweck, die geologische Karte im Bereich des geplanten Schachtgeländes zu verifizieren, ggf. zu verfeinern und nach Möglichkeiten die strukturgeologische Beschreibung der oberflächennahen Situation zu beschreiben.

Die geologische Aufnahme erstreckt sich über einen ca. 60 m langen Abschnitt, der sich im WNW-ESE Verlauf am Südwest-Rand des Bohrplatzes befindet. Dabei wurden sowohl die freigelegte Sohle des anstehenden Gesteins als auch eine bis zu 2 m hohe Böschung dokumentiert.

In der stratigraphischen Abfolge folgt unter der bis zu 0,2 m mächtigen Bodendecke ein dünner Lößschleier, darunter ein Schuttstrom aus Wellenkalk-Fragmenten (<1 m Mächtigkeit), der vermutlich vom südlich ausstreichendem Wellenkalk des Unteren Muschelkalks in die nördlich vorgelagerte Senke, in der Oberer Buntsandstein (Röt) ausstreicht, eingeschüttet wurde (Abbildung 1). Wahrscheinlich handelt es sich um jungquartären Deckschutt der Weichselkaltzeit.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 25

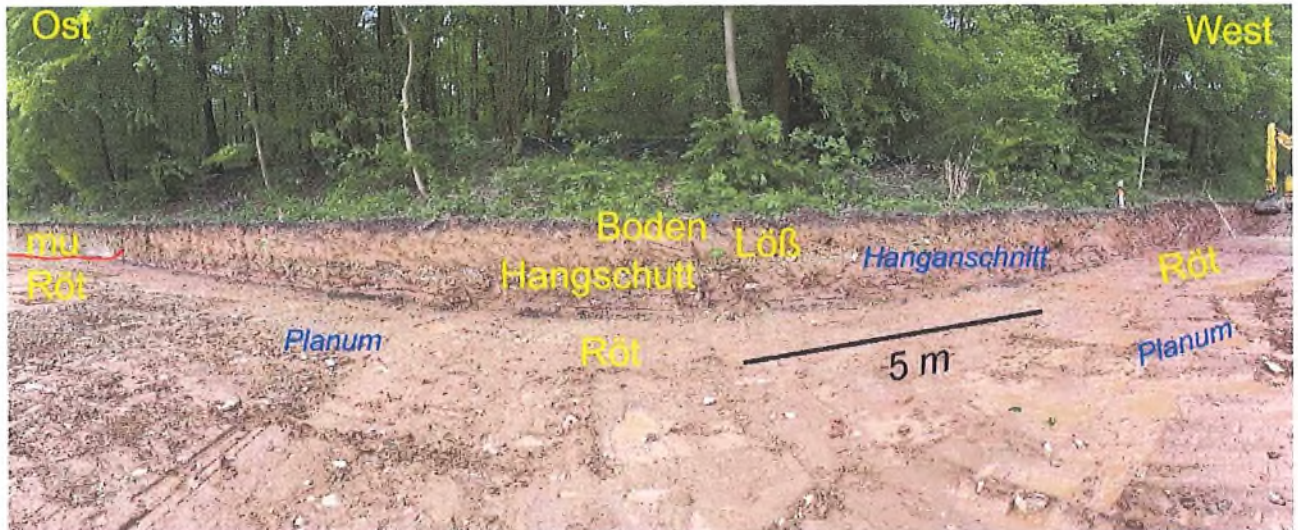


Abbildung 1: Geologisches Profil des Anschnitts (westlicher Teil) an der Südseite des im Bau befindlichen Bohrplatzes (Blick nach Süden).

Im mittleren Teil des Aufschlusses (Abbildung 2, linke Hälfte) ist die an dieser Stelle Ost-West streichende und mit ca. 45 – 50° nach S/SSW einfallende Grenze zwischen Unteren Muschelkalk und Oberen Buntsandstein (Röt) aufgeschlossen. Aufgrund des Fehlens der grauen Kalk-Mergel- und Tonsteine der Myophorien-Folge (4 – 5 m) des Oberen Buntsandstein und der sog. „Strohgelben Kalke“/Gelbe Grenzbank als Basislage des Unteren Muschelkalks lässt sich feststellen, dass das vorliegende Schichtenprofil tektonisch reduziert vorliegt.

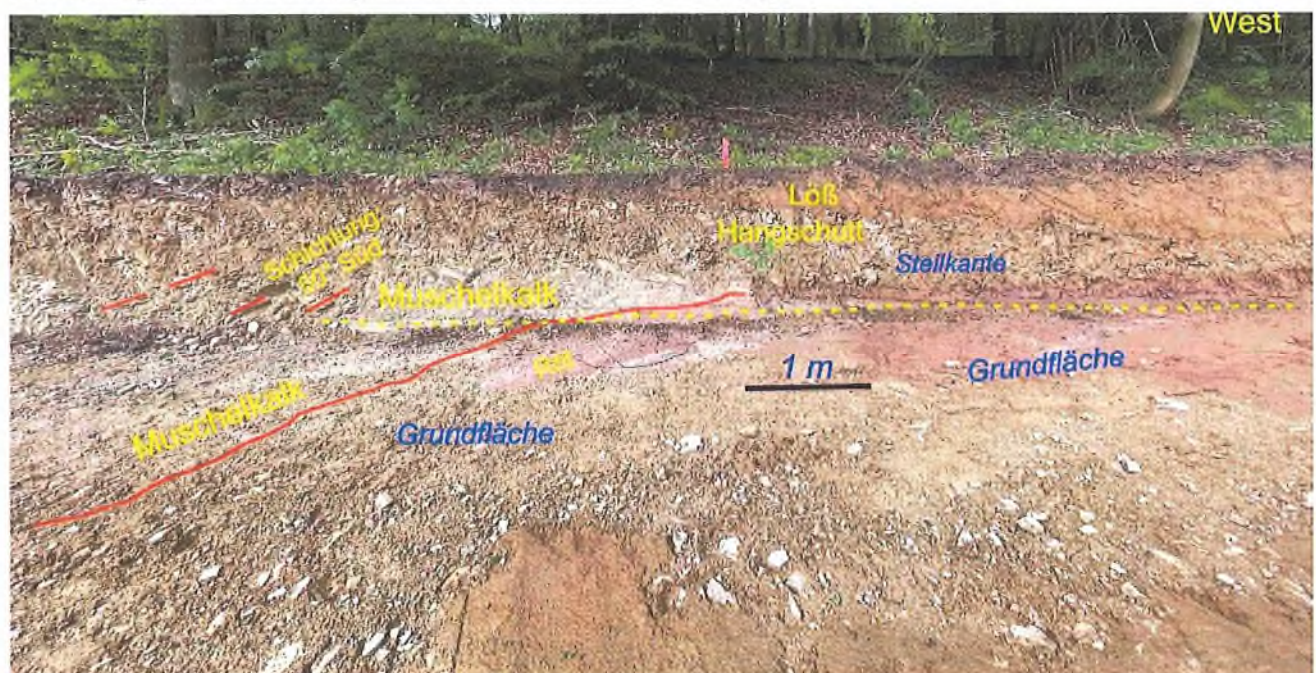


Abbildung 2: Geologisches Profil des Anschnitts (mittlerer Teil) Grenzbereich Röt/Muschelkalk (Blick nach Süden)

Östlich der Grenze Unterer Muschelkalk/Oberer Buntsandstein ist auf einer Profillänge von ca. 20 m Wellenkalk angeschnitten, der 50 – 60° nach Süd einfällt und den Forstweg diagonal schneidet,

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 26

so dass die Grenze Unterer Muschelkalk/Oberer Buntsandstein nach Osten dann im weiteren Verlauf einige Meter nördlich dieses Weges verläuft.

Die rötlichen und grauen Ton-Siltsteine des Oberen Buntsandstein (Röt) sind im gesamten Aufschluss durchgängig harmonisch-wellen-förmig gelagert. Die Schichten fallen im oberflächennah freigelegten Bereich mit Werten zwischen 45 und 50° in südwestliche Richtungen ein. Die Wellung ist ohne deutliche Vorzugsrichtung und Vergenz und kann als „Girlanden-Faltung“ angesprochen werden, welche typisch für hochteilbewegliche Salinarstrukturen und deren Randbereiche ist.

Im nördlich anschließenden Waldstück sind von quartären Lockergesteinen überdeckten und in den ehemaligen Tagebauen teilweise angeschnittenen Sulfataustritte (Röt 1 und Röt 2, z.T. mit Zechsteinanteilen) dokumentiert. Unter Berücksichtigung eines Schichteinfallens von ca. 50° nach Süd verlaufen diese Schichten unterhalb der für den Bohrplatz aufgeschlossenen Fläche und werden von der Bohrung R18 durchteuft.

Insgesamt bestätigt die vorgefundene Aufschlussituation im Zuge der Bohrplatzarbeiten die im Kartenbild der geologischen Übersichtskarte [19] dargestellte geologische Situation. Lediglich der Verlauf der kartierten Grenze Unterer Muschelkalk/Oberer Buntsandstein muss an einzelnen Stellen geringfügig nach Norden korrigiert werden.

4.2 Geologische Aufnahme Bohrkerne

4.2.1 Zweck und Methodik

Zur umfänglichen und nachvollziehbaren Beschreibung der geologischen Standortsituation entlang der potentiellen Schachttachse sowie der Bereitstellung von Probenmaterial für geotechnische/gebirgsmechanische und geochemische Untersuchungen wurde die Bohrung ab ca. 15 m mit durchgehender Kerngewinnung geteuft.

Nach Entnahme und Reinigung der Kerne wurden diese feldgeologisch aufgenommen und dokumentiert. Dazu gehört neben der lithologischen Zusammensetzung und einer vorläufigen grobstratigraphischen Einordnung insbesondere die Erfassung des tektonisch-strukturellen Inventars. Zur Charakterisierung des strukturellen Inventars wurden, sofern vorhanden, die nachfolgend aufgeführten Elemente erfasst:

- Farbe im frischen Bruch
- Härte und Form von Mineral- oder Gesteinskomponenten
- Mineralbestand soweit makroskopisch bestimmbar (Hilfsmittel: HCl, BaSO₄, Calcimetrie)
- Korngröße / Kristallgröße
- Matrixbeschaffenheit, Gefüge, Textur
- Porosität
- Geruch (v.a. während der Kernentnahme hinsichtlich H₂S und Kohlenwasserstoffe)
- tektonische Merkmale
- Erfassen von Trenn- und Schichtflächen einschließlich Beschreibung Klüftung,
- sonstige Auffälligkeiten.

Zusätzlich zu den Bohrkernbeschreibungen wurden Bohrkleinanalysen anhand von Spülproben entlang der gesamten Bohrstrecke im Abstand von 5 m durchgeführt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 27

Die Ergebnisse der geologischen Kernansprachen und Bohrkleinansprachen sind im Schichtenverzeichnis und Kernverzeichnis im Detail dargestellt und ermöglichen eine vorläufige lithostratigraphische Gliederung der Formationen. Im Bereich des Salinars werden die makroskopischen Gesteinsansprachen durch geochemische Untersuchungen auf den Kalium- und Bromid-Gehalt unterstützt. Zur lithostratigraphischen Feingliederung werden dabei Bromid/Halit Verhältnisse im Steinsalz herangezogen. Ferner dienen Kalium-Analysen der sicheren Unterscheidung von Steinsalz- und Kalisalz- Bereichen.

Nach der feldgeologischen Beschreibung der Bohrkerne und ggf. ergänzender Untersuchungen erfolgte für jeden Kernmarsch eine fotografische Dokumentation. Das Deckgebirge und der Residualbereich wurden im Auflicht, die Gesteine des Salinarabschnittes sowohl im Auflicht als auch im Durchlicht fotografiert. Bei makroskopisch erkennbaren Besonderheiten wurden während der Bohrkernaufnahme Detailfotos angefertigt. Analog zu den Übersichtsfotos wurden diese Bilder ebenfalls mit einer eindeutigen Fotonummer (einschließlich Angabe des Teufenabschnittes) fotografiert und mit einer kurzen Bildbeschreibung dokumentiert.

Die in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellten geologischen Profile und Ausführungen basieren auf den feldgeologischen Beschreibungen der Bohrkerne [2], [12].

Detaillierte Erläuterungen zur Durchführung der Fotodokumentation und den Kameraeinstellungen, der Bildbearbeitung sowie Erläuterungen zum Umgang mit Kernmarschlängen sind [11] zu entnehmen.

Im Anschluss an die geologische Beschreibung, die Fotodokumentation und die Verpackung der Kerne wurden die Kernkisten zunächst auf dem Bohrplatz gelagert und in regelmäßigen Abständen in das Kernlager der BGR Hannover transportiert.

Unter Beachtung der Anforderung zur Erstellung einer durchgehend lotrechten Bohrung, machte die räumliche Abweichung zwischen der Bohrspur der Kernbohrung des 3. Bohrabschnittes und der Bohrspur der nachfolgenden gerichteten Erweiterungsbohrung mit erneuter Kernbohrung bei etwa 480 m aus Gründen der Dokumentation eine Differenzierung beider Bohrstäbe erforderlich (siehe Kapitel 3.2). Bedingt durch das z.T. steile Einfallen der Schichten wurden mit beiden Bohrspuren im gleichen Teufenbereich unterschiedliche Lithologien/stratigraphische Einheiten erschlossen. Insbesondere die geologische Situation aber auch die für den gleichen Teufenbereich entlang unterschiedlicher Bohrspuren vorliegenden geophysikalischen Messungen machen die zuzuordnungstechnische Unterscheidung in 1. Loch, R18 (1.) und 2. Loch, R18 (2.), erforderlich.

4.2.2 Geologische Beschreibung Deckgebirge und Residual

Das erbohrte geologische Profil dokumentiert für den Bereich des Deckgebirges sowie den Residualbereich bis ca. 479 m (R18 (1.)) bzw. 490 m (R18 (2.)) eine überwiegend tonsteindominierte lithologische Abfolge mit untergeordneten Anteilen von bzw. in Wechsellagerung mit Mergelstein, Siltstein, Sandstein und Sand sowie dolomitischen Komponenten. Vereinzelt treten Anhydrite und Gips als Lagen, Linsen oder Kluft-/Rissfüllungen auf [2], [12]. Die lithostratigraphischen Einheiten lassen sich aufgrund charakteristischer Merkmale hinsichtlich Textur, Farbe, Festigkeit und Begleitfazies differenzieren.

Im Bereich von ca. 15 m bis etwa 120 m Teufe liegt eine Schichtabfolge aus überwiegend rotbraunen bis grünlichgrauen Tonsteinen vor. Zwischen 18,5 m treten Tonmergelsteine bis Mergelsteine auf. Anhydritische Lagen wurden zwischen 30,5 m bis 36 m sowie ab etwa 96 m bis 109 m erbohrt. Letzterer Bereich weist Hinweise auf Bruch- und Störungsstrukturen auf. Der erbohrte Bereich wurde im Rahmen der feldgeologischen Aufnahme sowie der Bohrkernbegehungen mit einzelnen Projektbeteiligten (BGR, Ercosplan) lithostratigraphisch als Oberer Buntsandstein eingeordnet.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 28

Ab etwa 120 m treten zunehmend immer wieder zwischen die Tonsteine geschaltete geringmächtige Sandsteine auf. Die Tonsteine sind braun bis grünlichgrau, anhydritführend und variieren in der Festigkeit. Anhydrit erscheint in hellgrauer bis dunkelgrauer Farbe, teilweise mikrostrukturiert und hart. Die Sandsteine sind rotbraun bis gelblich und schwach verfestigt. Ab etwa 158 m sind die Sandsteine deutlich oolithisch und werden dementsprechend dem „Rogenstein“ des Unteren Buntsandstein zugeordnet. Die Einschaltungen von Sandsteinen, teils Feinsandsteine bis Siltsteine oder Kalksandstein, in die überwiegend homogene Tonsteinabfolge setzt sich bis etwa 425 m fort. Aufgrund der vorhandenen Sandsteine und weiterer lithologischer und petrographischer Charakteristika ließ sich der Abschnitt ab 120 m überwiegend dem Unteren Buntsandstein zuordnen. In wie weit bzw. ob zunächst auch Gesteine des Mittleren Buntsandsteins erbohrt wurden, ließ sich feldgeologisch nicht differenzieren. Unter Verweis auf die lithologische Zusammensetzung lag diese Vermutung nahe. Allerdings stützen auch identifizierte strukturgeologische Elemente und die damit einhergehenden tektonischen Bewegungen die Annahme einer Überprägung der eindeutigen Merkmale des dem Unteren Buntsandsteins zugehörigen Rogenstein.

Ab 425 m treten zunehmend sulfatische (Anhydrit, Gips) Lagen und Klaster auf. Bis etwa 451,7 m liegen die Tonsteine überwiegend in festem Zustand vor, dann gehen sie in weichen, vornehmlich plastischen Zustand über. Eine Schichtung ist häufig nicht mehr erkennbar. Anhand dieser Zustandsänderung und unter Berücksichtigung der weiteren Merkmale wurde der Bereich ab etwa 425 m zunächst dem Residual zugeordnet.

Mit dem ursprünglichen Kernbohrloch R18 (1.) (siehe Kapitel 3.2 und 4.2.1) wird ab 479,25 gesichert Steinsalz angetroffen. In der Kernbohrung des gerichteten Bohrstabs R18 (2.) tritt Steinsalz erst bei 490,2 m auf [2], [12].

Das lithologische Profil der vornehmlich mit der R18 (1.) durchteuften Schichtenfolge ist Abbildung 3 zu entnehmen. Eine vorläufige lithostratigraphische Einordnung erfolgt unter Kapitel 4.2.4 und Tabelle 6.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 29

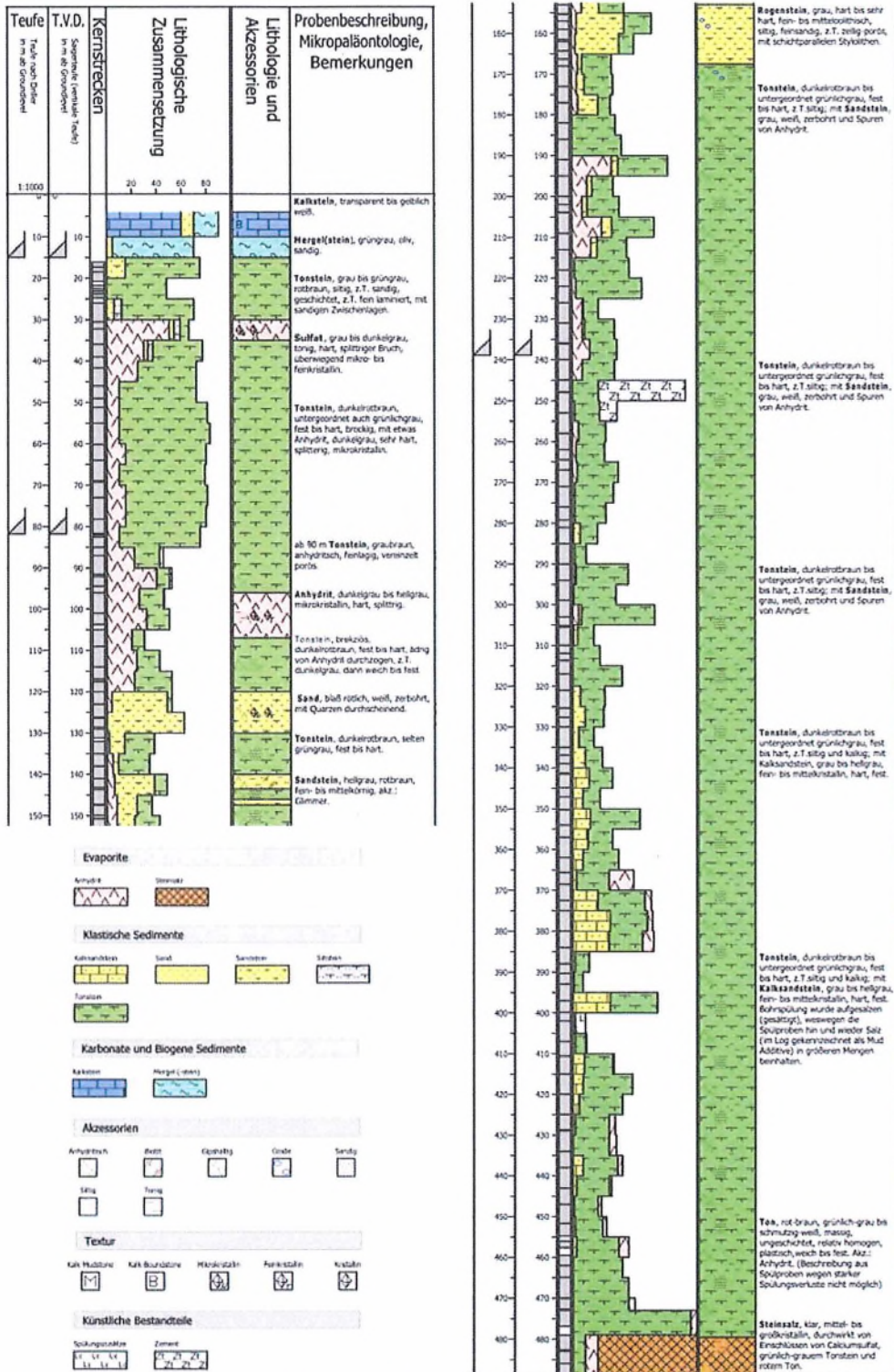


Abbildung 3: Lithologisches Profil der im Deckgebirge durchteuften Schichtenfolge – entspricht den Bohrabschnitten der R18 (1.).

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	JA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 30

4.2.3 Geologische Beschreibung Salinar

Die markante lithologische Änderung von (plastischem) Tonstein zu Steinsalz in sowohl der R18 (1.) als auch in der R18 (2.) markiert deutlich den Übergang in das Zechsteinsalinar.

Der gesamte Abschnitt bis zur Endteufe (900 m) ist überwiegend geprägt durch mächtige, z.T. steil stehende Steinsalzbereiche, die sich aufgrund ihrer jeweiligen Charakteristika bereits feldgeologisch den verschiedenen Einheiten der Leine- und Aller-Formation zuweisen ließen [2]. Die Steinsalze variieren in Farbe und Textur, von hellorange bis rotbraun, sind überwiegend mittelkörnig bis grobkristallin ausgebildet und enthalten vereinzelt rotbraune Toneinlagerungen sowie Anhydritbänder. Stellenweise sind Sulfatlagen, insbesondere Gips und Anhydritknollen, erkennbar.

Die Verfallung der gesamten salinaren Abfolge führt zu mehrfacher Unterbrechung der Steinsalzbereiche, vor allem durch den Roten Salztön mit Pegmatitanhydrit bei 585 m bis 602,9 m und 735,8 m bis 759,7 m. In die rotbraunen festen Tonsteine sind häufig klare Salzkristalle eingesprengelt, mitunter auch Steinsalzlagen eingeschaltet. Auch wurden Sulfateinschlüsse und -bändchen beobachtet. Für das höhere Auftreten des Roten Salztöns kann aufgrund der feldgeologischen Aufnahme bereits von einem steileren Einfallen gegenüber dem tieferen ausgegangen werden [2].

Innerhalb des Steinsalzbereichs zwischen etwa 798 m bis 820 m kommen immer wieder dünne Anhydritbänke vor, die sich deutlich als Anhydritmittel innerhalb des Anhydritmittelsalzes identifizieren lassen [2].

Eine vorläufige lithostratigraphische Einordnung erfolgt unter Kapitel 4.2.4 und Tabelle 6 bzw. Tabelle 7. Das lithologische Profil der im Zechsteinsalinar mit der R18 (2.) durchteuften Schichtenfolge ist Abbildung 4 zu entnehmen. Der Übergang in das Steinsalz im ursprünglichen Bohrst R18 (1.) bei 479 m wird aus Abbildung 3 ersichtlich.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 31

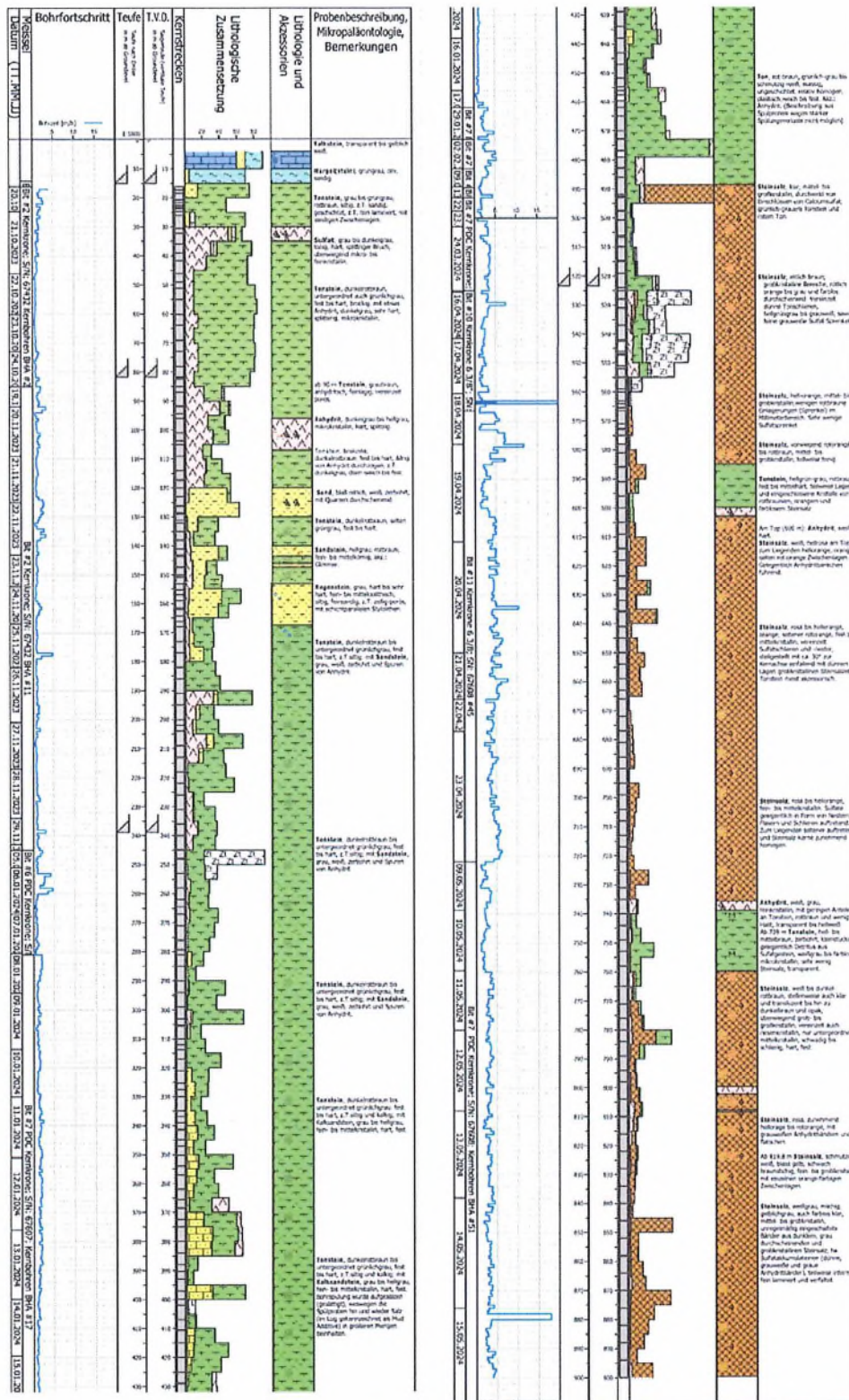


Abbildung 4: Lithologisches Profil der im Deckgebirge durchteuften Schichtenfolge – entspricht dem Bohrabchnitt der R18 (2.); Legende siehe Abbildung 3.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 32
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

4.2.4 Vorläufige stratigraphische Einordnung

Die Gliederung der lithostratigraphischen Einheiten wurde durch die Zusammenführung der geologischen Feldaufnahme und der Analyse petrographischer Merkmale der Bohrkern- und Spülproben sowie unter Berücksichtigung verschiedener Bohrkernbegehungen nach Abschluss der Bohrarbeiten vorläufig festgelegt. Die lithostratigraphische Einordnung erfolgt in nachstehenden Übersichten jeweils für die Erkundungsbohrung R18 (1.) (Tabelle 6) und R18 (2.) (Tabelle 7).

Eine Verifizierung und Präzisierung des Profils erfolgt im Ergebnis der übergreifenden Betrachtung und Gegenüberstellung von detaillierter Bohrkernaufnahme, Auswertung ausgewählter bohrlochgeophysikalischer Messungen sowie geochemischer und palynologischer Untersuchungen unter Kapitel 5.1.

Tabelle 6: Vorläufige lithostratigraphische Gliederung R18 (1.) basierend auf feldgeologischer Aufnahme [2] und anschließenden Bohrkernbegehungen.

Teufe [m]		Periode	Epoche	Stufe	Formation	Subformation
von	bis					
3,26	117,50	Trias	Buntsandstein	Oberer Buntsandstein	Röt	undifferenziert
117,50	120,00			Störungszone		
120,00	129,00			(Mittlerer (?) / Unterer Buntsandstein)-		
129,00	397,50			Unterer Buntsandstein	undifferenziert	
397,50	422,04	Perm	Zechstein		Fulda (z7)	Bröckelschiefer
422,04	427,07				Friesland (z6)	Friesland-Ton
427,07	427,46				Ohre (z5)	Ohre Anhydrit
427,46	479,60				Residual (R)	Residualgestein
479,60	483,35				Leine (z3)	Tonmittelsalz
483,35	483,95				Aller (z4)	Roter Salzton
483,95	(489,25)				Leine (z3)	Tonmittelsalz

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 33
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 7: Vorläufige lithostratigraphische Gliederung R18 (2.) basierend auf feldgeologischer Aufnahme [2] und anschließenden Bohrkernbegehungen.

Teufe [m]		Periode	Epoche	Stufe	Formation	Subformation	
von	bis						
3,26	117,50	Trias	Buntsandstein	Oberer Bunt-sandstein	Röt	undifferenziert	
117,50	120,00			Störungszone (Mittlerer (?) / Unterer Buntsandstein)-			
120,00	129,00						
129,00	397,50			Unterer Bunt-sandstein	undifferenziert		
397,5	422,04	Perm	Zechstein		Fulda (z7)	Bröckelschiefer	
422,04	427,07				Friesland (z6)	Friesland-Ton	
427,07	427,46				Ohre (z5)	Ohre-Anhydrit	
427,46	488,60					Residual (R)	Residualgestein
488,60	490,20				Aller (z4)	Roter Salzton (z4RT)	
490,20	519,00				Leine (z3)	Tonmittelsalz (z3TM)	
519,00	574,20					Schwadensalz (z3SS)	
574,20	585,00					Tonmittelsalz (z3TM)	
585,00	599,90				Aller (z4)	Roter Salzton (z4RT)	
599,90	602,90					Pegmatit-Anhydrit (z4PA)	
602,90	610,70					Basissalz (z4BS)	
610,70	722,10					Schnee- und Rosensalz (z4SS + z4RS)	
722,10	735,80					Basissalz (z4BS)	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 34
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Teufe [m]		Periode	Epoche	Stufe	Formation	Subformation
735,80	739,00					Pegmatit-Anhydrit (z4PA)
739,00	759,70					Roter Salzton (z4RT)
759,70	782,40				Leine (z3)	Tonmittelsalz (z3TM)
782,40	798,10					Schwadensalz (z3SS)
798,10	819,35					Anhydritmittelsalz (z3AM)
819,35	831,50					Buntes Salz (z3BT) Bändersalz (z3BD) Ronnenberg-Horizont (z3RO) Banksalz (z3BK)
831,50	(900,00)) ET					(Gamma-Linien-) Orangen- salz (z3OS) (Beta-)Liniensalz (z3LS)

4.3 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Im Sinne einer vereinfachenden Zusammenfassung werden die geophysikalischen Bohrlochmessungen für die Darstellung der Ergebnisse wie folgt unterschieden:

- Geowissenschaftliche (klassische) Bohrlochmessungen einschließlich technischer bzw. Kontrollmessungen, die i. d. R. für jeden Bohrlochabschnitt und kontinuierlich über die gesamte Länge des betreffenden Abschnitts in der Kernbohrung, in Ausnahmefällen auch/oder nur in der Erweiterungsbohrung durchgeführt wurden. Die hierunter gefassten Messungen erfassen die petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine bzw. des Gebirges entlang der Bohrlochwand und bohrlochnahen Bereich.
- Elektromagnetische Reflexionsmessungen, die nach Erreichen der Endteufe der Bohrung lediglich im Bohrlochabschnitt innerhalb des Zechsteinsalinars durchgeführt wurden und je nach Messfrequenz Strukturen in mehreren Metern bis einigen 100-Metern um das Bohrloch im Gebirge erfassen können.
- Seismische Bohrlochmessungen, die ebenfalls erst nach Erreichen der Endteufe, aber über die gesamte Bohrlochlänge durchgeführt wurden und ebenfalls Strukturen in der Umgebung des Gebirges erfassen können.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 35

4.3.1 Messprogramm und Messziele

Für die Erhebung petrophysikalischer Messdaten als Grundlage für die Beschreibung der geologischen, struktureologischen und hydrogeologischen Situation in Ergänzung zu den Bohrkernaufnahmen wurden in der R18 eine Reihe von verschiedenen Messverfahren und Sonden eingesetzt. Die Messverfahren und die jeweiligen Mess- und Untersuchungsziele sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Zusammenstellung der in der R18 durchgeführten geophysikalischen Bohrlochmessungen und deren jeweilige Messziele.

Messverfahren	Abk.	Ziel(e)
Geowissenschaftliche (klassische) Bohrlochmessungen einschließlich technischer bzw. Kontrollmessungen		
Bohrpfadvermessung (Gyro)	BA	Vermessung des Bohrpfades/Bohrlochverlaufs
Kaliber	CAL	Bohrlochbeschaffenheit und Volumenbestimmung Bohrloch Qualitätskontrolle Auswahl Testbereiche hydraulische/geotechnische Packer-tests Ggf. Ableitung gebirgsmechanischer Erkenntnisse (z. B. Breakouts, Washouts)
Spektral-Gamma-Ray	SGR	Spezifisches Erfassen der natürlichen Gamma-Strahlung der Uran-, Thorium- und Kalium-40-Isotope zur Charakterisierung der Ton und Evaporitbereiche Gesteinstypisierung.
Temperatur	TEMP	Bestimmen des Temperaturgradienten und daraus abgeleitet mögliche Zuflüssen ins Bohrloch durch Messen der Temperatur in der Bohrspülung.
Salinität	SAL	Bestimmung des Spülungswiderstandes Aussagen zur Grundwasserdynamik Bestimmung von Zu- und Abflusshorizonten
Gamma-Gamma	GG	Dichtemessung des bohrlochnahen Gebirges zur Auflastberechnung geologischen Charakterisierung Unterstützung seismische Modellierung
Nuklearmagnetische Resonanz	NMR	Erkennen von wasserhaltigen Schichten des bohrlochnahen Gebirgsbereiches bzw. Bestimmung des Wassergehalts des bohrlochnahen Gebirgsbereichs

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 36
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Messverfahren	Abk.	Ziel(e)
Akustischer Bohrlochscanner	ABI/ATV	<p>Lagegetreue Abbildung der geologischen Strukturen (Trennflächen, Raumlage Trennflächen) der Bohrlochwandung</p> <p>Ableitung von Einfallen und Azimut entsprechender Strukturen im unmittelbaren Bohrlochumfeld</p> <p>Erkennen von permeablen Trennflächen bzw. allgemein Charakterisierung des Trennflächeninventars</p>
Widerstandsmessung mit Eigenpotential (Spontaneous Potential)	RES mit SP	Messung des elektrischen Gebirgswiderstandes zum Erkennen von Bruch- und permeablen Zonen sowie zum Erkennen der Formationswassersalinität
Akustische Messungen (Sonic) (p-sonic), Scherwellen-Log (s-sonic)	Sonic (BHC) / Dipole Sonic (XDA)	Bestimmung gebirgsmechanischer Parameter durch Messung der P- und S-Wellengeschwindigkeiten mittels Kohärenz-Analyse zur geomechanischen Parametrisierung des Gebirges, zur Auflastberechnung, zur geologischen Charakterisierung sowie zur seismischen Modellierung
Zementkontrollmessung	CBL	Qualitative Charakterisierung Anbindung Verrohrung-Zement anhand Ersteinsatz-Amplitude einer akustischen Welle und ggf. Ableitung weiterer Entscheidungen/Vorgehensweisen
Elektromagnetische Reflexionsmessungen		
richtungssensitive elektromagnetische Reflexionsmessungen (EMR, 3D-Bohrlochradar) mit Frequenzen zwischen 50 MHz – 250 MHz	EMR	Erfassung struktureller Elemente in Form von Radarreflexionen mit georeferenzierter räumlicher Zuordnung der Reflektoren
Seismische Bohrlochmessungen		
VSP-Messung	VSP	Teufenbezogenes Einhängen der aus der 3D-Seimik gewonnen Zeitdaten sowie der Verifizierung der Raumlage verschiedener intrasalinärer geologischer Einheiten einschließlich der Grenze Salinar/Deckgebirge

Für die Bohrabschnitte 1 bis 3 bis 489 m R18 (1.) bzw. 525 m (R38 (2.)) Teufe wurden zusätzlich Cement-Bond Messungen zur Überprüfung der Zementanbindung im Anschluss an die Verrohrung und Zementation durchgeführt. Zusätzliche Verlaufsmessungen wurden nach Bedarf durchgeführt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 37
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Eine übersichtliche Zusammenfassung der in den jeweiligen Bohrlochabschnitten durchgeführten geophysikalischen Bohrlochmessungen geben Tabelle 9 bis Tabelle 13.

Tabelle 9: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (1.) im 1. Bohrabchnitt.

Messeinsatz	1	2	3
Datum	25.10.2023	11.11.2023	16.11.2023
Bohrloch [Zoll]	6 3/8	22	22
Messteufe [m]	85,0	85,0	85,0
Verrohrung [Zoll]	-	-	18 5/8
Rohrschuh [m] ¹⁾	(15,0)	(15,0)	(15,0)
Verrohrungsteufe [m]	(15,0)	(15,0)	81,8
Bohrspülung	WBM 1,00 s.g.	WBM 1,00 s.g.	WBM 1,00 s.g.
Temperatur [°C]	20	20	15
Gyro/BA	x	x (EMS)	-
Kaliber	x	-	-
SGR	x	-	-
GR	x	x	x
Temp	x	x	x
SAL	x	-	-
GG	x	-	-
NMR	x	-	-
ABI	x	-	-
RES	x	-	-
Sonic (BHC)	x	-	-
CBL	-	-	x
SP	x	-	-
EMR 50 MHz	-	-	-
EMR 250 MHz	-	-	-
VSP	-	-	-

¹⁾ vorangegangene Rohrtour

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 38
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 10: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (1.) im 2. Bohrabchnitt.

Messeinsatz	4	4b	5	6
Datum	30.11.- 01.12.2023	08.12.2023	17.12.2023	03.01.2024
Bohrloch [Zoll]	6 3/8	6 3/8	17 1/2	17 1/2
Messteufe [m]	245,0	245,0	242,0	242,0
Verrohrung [Zoll]	-	-	-	13 3/8
Rohrschuh [m] ¹⁾	81,8	81,8	81,8	81,8
Verrohrungsteufe [m]	-	-	-	238,9
Bohrspülung	WBM 1,00 s.g.	WBM 1,00 s.g.	WBM 1,00 s.g.	WBM 1,00 s.g.
Temperatur [°C]	20	20 / k.A.	20	16
Gyro/BA	x	-	x	-
Kaliber	x	x	x	-
SGR	x	--	-	-
GR	x	x	-	x
Temp	x	x	-	x
SAL	-	-	-	-
GG	x	-	-	-
NMR	x	x	-	-
ABI	x	x	-	-
RES	x	-	-	-
Sonic (BHC)	x	-	-	-
CBL	-	-	-	x
SP	x	-	-	-
EMR 50 MHz	-	-	-	-
EMR 250 MHz	-	-	-	-
VSP	-	-	-	-

¹⁾ vorangegangene Rohrtour

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 39
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 11: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (1.) im 3. Bohrabchnitt.

Messeinsatz	7	8	9
Datum	21.01. – 23.01.2024	04.02 – 05.02.2024	10.02.2024
Bohrloch [Zoll]	6 3/8	6 3/8	6 3/8
Messteufe [m]	458,0	480,0 / 482,0	485,0
Verrohrung [Zoll]	-	-	-
Rohrschuh [m] ¹⁾	81,8	81,8	81,8
Verrohrungsteufe [m]	-	-	-
Bohrspülung	WBM 1,00 s.g.	WBM 1,20 s.g.	WBM 1,20 s.g.
Temperatur [°C]	25	26	25
Gyro/BA	x	x	-
Kaliber	x	x	-
SGR	x	x	-
GR	x	x	x
Temp	x	x	x
SAL	x	x	x
GG	x	-	-
NMR	x	-	x
ABI	x	x	-
RES	x	x	-
Dipole Sonic (XDA)	x	-	x
CBL	-	-	-
SP	x	x	-
EMR 50 MHz	-	-	-
EMR 250 MHz	-	-	-
VSP	-	-	-

¹⁾ vorangegangene Rohrtour

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 40

Tabelle 12: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (2.) im 3. Bohrabschnitt.

Messeinsatz	10	11
Datum	04.04.2024	15.-16.04.2024
Bohrloch [Zoll]	12 ¼	12 ¼
Messteufe [m]	512,0	525,0 / 520,0
Verrohrung [Zoll]	-	9 5/8"
Rohrschuh [m] ¹⁾	238,9	238,9
Verrohrungsteufe [m]	-	522,0
Bohrspülung	Brine 1,22 s.g	Brine 1,22 s.g
Temperatur [°C]	22	k.A.
Gyro/BA	-	x
Kaliber	x	-
SGR	x	-
GR	x	x
Temp	x	x
SAL	x	-
GG	-	-
NMR	-	-
ABI	-	-
RES	-	-
Dipole Sonic (XDA)	-	-
CBL	-	x
SP	-	-
EMR 50 MHz	-	-
EMR 250 MHz	-	-
VSP	-	-

¹⁾ vorangegangene Rohrtour

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 41
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 13: Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen R18 (2.) im 4. Bohrabchnitt.

Messeinsatz	12	13	14	15	16	17
Datum	21.04.2024	24.04. – 26.04.2024	12.05.2024	15.-16.05. & 23.05.2024	23.05.- 24.05. / 01.06.- 03.06.2025	28.05.- 01.06.2024
Bohrloch [Zoll]	6 3/8	6 3/8	6 3/8	6 3/8	6 3/8	6 3/8
Messteufe [m]	660,0	720 / 722	780,0	900,0	800,0	820,0
Verrohrung [Zoll]	-	-	-	-	-	-
Rohrschuh [m] ¹⁾	522,0	522,0	522,0	522,0	522,0	522,0
Verrohrungsteufe [m]	-	-	-	-	-	-
Bohrspülung	Brine 1,21 – 1,23 s.g.	Brine 1,21 – 1,23 s.g.	Brine 1,21 – 1,23 s.g.	Brine 1,21 – 1,23 s.g.	Oil-based mud	Brine 1,21 – 1,23 s.g.
Temperatur [°C]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Gyro/BA	x	x	x	x	-	-
Kaliber	-	x	-	x	-	-
SGR	-	x	-	x	-	-
GR	-	x	-	x	-	-
Temp	-	x	-	x	-	-
SAL	-	-	-	-	-	-
GG	-	x	-	x	-	-
NMR	-	x	-	x	-	-
ABI	-	x	-	x	-	-
RES	-	x	-	x	-	-
Dipole Sonic (XDA)	-	x	-	x	-	-
CBL	-	-	-	-	-	-
SP	-	-	-	-	-	-
EMR 50 MHz	-	-	-	-	x	-
EMR 250 MHz	-	-	-	-	x	-
VSP	-	-	-	-	-	x

¹⁾ vorangegangene Rohrtour

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 42

Die Angaben unter Messteufe vernachlässigen, dass einzelne Sonden aus sondentechnischen Gründen nicht bis Bohrlochsohle gefahren wurden (NMR). Ebenfalls wird je nach Länge der Sonde und/oder technischer Konfiguration der Sonden für den jeweiligen Messeinsatz (mehrere Sonden am Strang) nicht mit jeder Sonde der gesamte Messbereich erfasst. Auf eine detaillierte Ausweisung diesbezüglich wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

Während des dritten Bohrabschnittes der R18 (1.) musste nach Vertiefung des Bohrlochs von 462 m auf zunächst 483 m und später auf 489,25 m aufgrund von Sicherheitsbedenken bezüglich des Bohrlochs und zur Vermeidung technischer Risiken auf den Einsatz der Gamma-Gamma-Messung im offenen Bohrloch verzichtet werden. Nach Abschluss der Bohrarbeiten wurde im Zuge des Messeinsatzes 15 (vgl. Tabelle 13) die Dichtemessung durch die Verrohrung durchgeführt. Aufgrund von Unsicherheiten bei Anwendung der Korrekturwerte kann die Plausibilität der Messdaten nicht abschließend bewertet werden, damit sind die Daten bislang nicht in die Auswertung und Darstellungen eingeflossen [13].

Alle Messungen wurden anhand der Messkabellänge und -spannung auf die Geländeoberkante (logger's depth, GOK 197,99 m NN) referenziert.

Die einzelnen angewandten physikalischen Messverfahren sowie die technischen Spezifikationen der jeweiligen Messsonden sowie Einzelheiten zur Kalibration und Verifikation der Messsonden vor Einsatz werden im Folgenden kurz oder detailliert in dem Bericht von DMT [13], [14], [15] erläutert.

Für die Bearbeitung der finalen Daten und der Erstellung der Composite Plots wurden alle Messdaten in die Software WellCAD (V 5.7) geladen und zunächst durch DMT bearbeitet. Notwendige Korrekturen der einzelnen Messdaten sowie für die Darstellung im Composite Log durchgeführte Auswertungen werden, wenn nicht nachfolgend aufgeführt, durch DMT in dem oben aufgeführten Bericht detailliert beschrieben.

Die Messdaten der einzelnen Sektionen wurden in den Überlappungsbereichen gespleißt. Hierbei wurden die Daten der oberen Sektion gegenüber den Daten der darunterliegenden Sektion bevorzugt. Für die Bohrungen R18 (1.) und R18 (2.) wurden getrennte Plots erstellt. Für die ATV-Daten wurden zusätzliche Interpretationsplots erstellt [20], [21].

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Messungen zusammengefasst.

4.3.2 Geowissenschaftliche Bohrlochmessungen

Die Hauptziele der geophysikalischen Messungen waren mit Blick auf die Bereitstellung von Planungsparametern für die Schachtplanung die lithologische Ansprache, die Porositätsbestimmungen der Gesteinsschichten und die Bestimmung der Porenwassersalinität im gesamten Bohrloch. Hinzu kamen weitere Parameter, die mit den unterschiedlichen, nachfolgend beschriebenen Messverfahren, bestimmt wurden. Bei der Auswertung der Messdaten wurden diese zunächst jeweils einzeln betrachtet, aber für ergänzende Betrachtungen und die Bewertung der Ergebnisse sowie deren Plausibilität anderen Messungen gegenübergestellt.

Die nachstehend beschriebenen Ergebnisse basieren auf [13] einschließlich zugehöriger Anlagen bzw. ergänzen diese um BGE-eigene Betrachtungen. Die Auswertemethodik und erforderliche Schritte der Datenbearbeitung sowie Erläuterungen zu den zugehörigen Anlagen sind ebenfalls in [13] beschrieben. In den verwiesenen Composite-Plots erfolgt eine Gegenüberstellung der relevanten Bohrlochmesskurven (Logs) getrennt nach R18 (1.) bzw. Deckgebirge bzw. 1.-3. Bohrlochabschnitt [22] und R18 (2.) bzw. Zechsteinsalinar bzw. 4. Bohrlochabschnitt [23].

Da die Zementkontrollmessungen nicht dem Zweck der geowissenschaftlichen Erkundung dienen, wird im Folgenden nicht weiter darauf eingegangen.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 43

Verlaufsmessung, Gyro – Die Gyromessung wird durchgeführt, um den räumlichen Verlauf des Bohrlochs zu vermessen. Dafür verwendet die Messsonde Beschleunigungsaufnehmer zur Messung der Neigung und Gyroskope zur Messung der Winkeländerung gegenüber einer genauen Ausrichtung vor Einfahrt in das Bohrloch. Da die Bohrung einen möglichst streng lotrechten Verlauf aufweisen sollte, wurde diese Messung zusätzlich zu jeder Sektionsmessung auch nach Bedarf während der Erstellung der einzelnen Bohrabschnitte durchgeführt (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 9 bis Tabelle 13).

Zusätzlich zur Kontrolle des Bohrlochverlaufs wird der korrekte Bohrlochpfad für die Verwendung aller weiteren im Bohrloch erhobenen Messdaten zur korrekten räumlichen Platzierung der Bohrung und der Daten zwingend benötigt.

Die Messdaten wurden durch die BetriebsmarkscheiderieASSE geprüft und die Abweichungsdaten des Bohrlochs (Azimuth- und Inklinationsdaten) der finalen Verlaufsmessungen vom 15.05.2024 und 16.05.2024 interpoliert für die weitere Nutzung als Darstellung der verschiedenen Bohrlochmesskurven sowie für die 3D-Modellierung bereitgestellt (Abbildung 5).

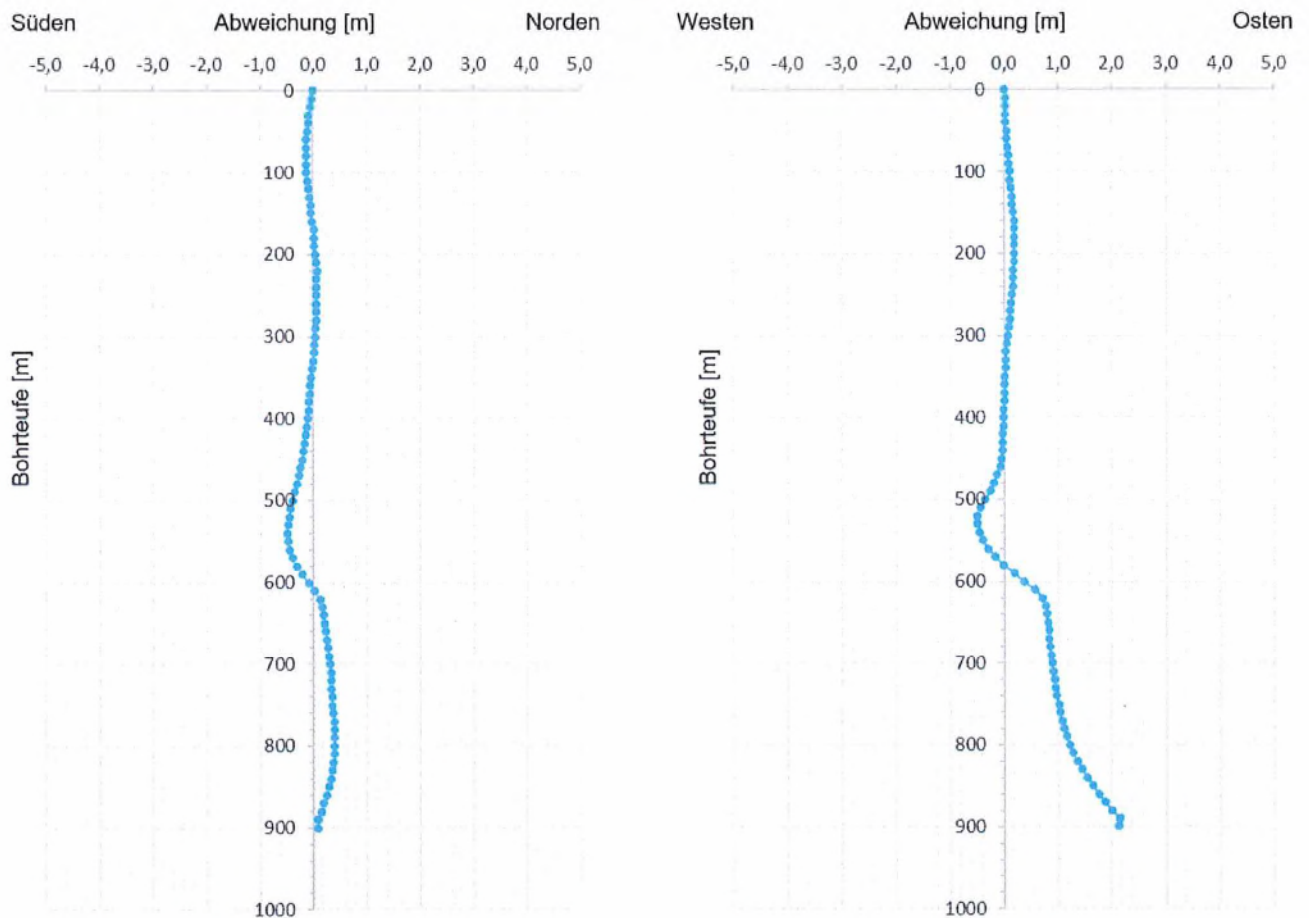


Abbildung 5: Markscheiderische Nachberechnung Bohrlochmessung DMT (Run 3 und 4, Messung 15.05.2024).

Kalibermessung – Für die Messung der Maßhaltigkeit des Bohrlochs wurde ein 6-Arm Kaliber verwendet. Dabei werden die beiden jeweils gegenüberliegenden Arme verwendet um den jeweiligen Durchmesser des Bohrlochs zu ermitteln. Es werden vom zentrierten Tool aus insgesamt

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 44
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

sechs Radian, drei Durchmesserspuren sowie ein resultierender Mittelwert gemessen und dargestellt.

Neben seiner Funktion zur Volumenbestimmung für Verfüllmaßnahmen kommt der Kalibermessung eine besondere Bedeutung bei der Auswahl von Messbereichen für die Platzierung der hydraulischen Packersysteme, aber auch für die Aus- und Bewertung der weiteren bohrlochgeophysikalischen Messdaten zu. Bereiche im Bohrloch mit Bohrlochauswaschungen und Ausbrüchen können die Ergebnisse der Messungen verfälschen, da sich an diesen Stellen der Abstand zur Bohrlochwand oder die höhere Schichtdicke der von den Signalen zu durchdringenden Spülungsschicht auf die von der Sonde erfassten Signale und in der Folge auf die Messergebnisse auswirkt. Ein Beispiel dafür zeigt die NMR-Messung, die an ausgewaschenen Stellen (u.a. 24 m, 134 m, 471 m, 478 m) einen deutlich höheren Anteil von frei beweglichen Fluidanteilen bzw. höhere Porosität ausweist, als tatsächlich vorhanden ist.

Dagegen kann untermaßiges Kaliber (Bohrlochdurchmesser geringer als Meißelgröße) ein sich verengendes Bohrloch durch quellende Tone oder drückendes Salz anzeigen und damit auch Hinweise auf besondere Lithologien geben.

In Tabelle 13 sind Bereiche mit erkennbaren Kalibrerweiterungen zusammengefasst und mögliche Ursachen geologisch eingeordnet.

Tabelle 14: Zusammenstellung Bereiche mit erweiterten Bohrlochdurchmessern und deren geologische Einordnung der möglichen Ursache(n).

Bohrlochabschnitt	Teufenbereich [m]	Geologische Einordnung
1	ca. 16	Auswaschungen Bereich Rohrschuh Hilfsstandrohr
	ca. 23 – 24	Bereich mit Spülungsverlusten (siehe Kapitel 4.9) – korrelierbar mit Dichte und NMR/Porosität, vermutlicher offene Bruchfläche, ggf. auch Zusammenhang mit verkarsteten (Sulfatkarst) Bereichen
2	mehrere kleine zwischen etwa 119 – 125	Vermutlich lithologisch bedingt – Wechsellagerung ggf. auch in Gesamtschau Bereich Störungszone bzw. Übergang Oberer Buntsandstein zu Unterem Buntsandstein, letzteres sowohl aufgrund lithologischen Wechsels als auch in Verbindung mit Wechsel Schichteinfallen
	(130,5 -) ca. 134	Unter Verweis auf Dichte-, Widerstands- und NMR-Log vermutlich Zusammenhang zu größerer Trenn-/Bruchfläche – einmal mehr spricht auch verändertes Schichteinfallen ab 135 m dafür (siehe Erweiterung bei 119-125 m)
3	ca. 331 – 334	Vermutlich lithologisch bedingt (Wechsellagerung, Einschaltungen Sandstein) ggf. auch in Kombination mit internen Verfaltungen (gem. ABI Wechseln der Einfallsrichtung und erkennbare Faltenachsen bei 336,5m und etwa 337,7 m);
	ca. 337	
	ca. 339 m	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 45

Bohrloch- abschnitt	Teufenbereich [m]	Geologische Einordnung
		Auch spannungsbedingte vertikale Bohrlochausbrüche möglich und o.g. Einflüsse nur bedingt oder ggf. auch ohne Zusammenhang
	ca. 357,5 – 358	Ebenfalls vermutlich lithologisch bedingt durch eingeschaltete/zwischengelagerte Kalk-/Feinsandsteinlage und Siltsteine (bzw. Wechsel von weicherem und etwas härterem Gesteinsmaterial); allerdings in dem Bereich auch verschiedene Trennflächen im ABI ausgewiesen – allerdings durch Autotrack nicht immer eindeutig
	ca. 367,5 – 376	
	ca. 419 – 431	Vermutlich ebenfalls einhergehend mit lithologischen Wechseln durch Einschaltungen Sandsteine bzw. in Bohrkernen beobachteten Sulfatlagen und/oder Sulfate in Kluffüllungen – korreliert überwiegend auch mit veränderten Leitfähigkeiten im Widerstandslog
	ca. 454 – 460	Aufgrund in Bohrkernen beobachtetet Anhydrit-/Gipslagen bzw. Sulfateinschaltungen wahrscheinlich lithologisch bedingt, ggf. zu berücksichtigten steiles Einfallen zur Bohrlochachse (zunehmende Anhydritanteil spiegelt sich ggf. auch in Widerstandskurve wider)
	ca. 466 – 468	
	ca. 469 – 473	
	ca. 477 – 479,5	
4	ca. 522,5 – 525	Auswaschungen unterhalb Rohrschuh 13 3/8“ Rohrtour
	ca. 527 – 532	Ggf. Einfluss durch Spülungsumstellung
	ca. 536,5 – 539,5	Ggf. Einfluss durch Spülungsumstellung
	ca. 571 – 572	Ggf. in Verbindung mit beschriebenen tonigen Anteilen im Bohrkern
	ca. 585,5	In Zusammenhang mit Auftreten Roter Salzton (Basis), wobei Kalibriererweiterungen nicht über die vollständige erbohrte Mächtigkeit
	ca. 590,5 – 594	
	ca. 743 – 759,5	In Zusammenhang mit Auftreten Roter Salzton (Basis), wobei Kalibriererweiterungen nicht über die vollständige erbohrte Mächtigkeit

Das in der Bohrung R18 im Bereich von 45 m bis 85 m gemessene Untermaß von bis zu 5 mm ist auf ein technisches Problem bei der Kalibration der Sonde zurückzuführen [13] und wurde für die nachfolgenden Einsätze behoben.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 46

Gamma Ray – Das Gamma Ray misst die natürlich Gammastrahlung des durchteuften Gesteins. In den Composite Logs [22], [23] wird die Kurve GRC (Gamma Ray corrected) dargestellt. Diese Kurve wurde bereits vor Ort für die Parameter Bohrlochdurchmesser (Meißelgröße) und Spüldichte korrigiert.

Das Gamma Ray-Log wird bei der Bohrung R18 vorrangig zur Korrelation für die verschiedenen Messdurchgänge genutzt und kann in Verbindung mit ggf. nachfolgenden den Kerngammaaufzeichnungen dazu verwendet werden, die Bohrkern im Verhältnis zu den gemessenen petrophysikalischen Bohrlochdaten auf korrekte Teufe zu korrelieren und somit unter anderem auch auf Kernverluste rückschließen zu können. Besonders wichtig ist eine möglichst präzise Kernteufenkorrelation bei der Ermittlung von gesteinsphysikalischen Parametern am Kern und die Zuordnung zu den jeweiligen in-situ-Lithologien entlang der Bohrstrecke. Weiterhin können die kabelgebundenen Bohrlochmessungen zusätzlich zur gemessenen Kabelkopfspannung auf Dehn- und Staucheffekte (stick-slip-effects) während den Messungen und ggf. resultierenden notwendigen Korrekturen geprüft werden, was ebenfalls bei der Verwendung der weiteren Bohrlochmessdaten eine Rolle spielt. Im dritten Bohrlochabschnitt (12 ¼", 245 – 525 m) wird in der R18 (2.) diesbezüglich im Tonmittelsalz ab 493 m von Widerstand beim Einfahren der Messsonden und ab 513 m von einem Stillstand des Messstranges vermutlich durch Verengung des Bohrlochs auf Grund von Nachfall oder drückendem Salz berichtet.

Die Kurve zeigt insgesamt keine besonderen Auffälligkeiten und keinen Widerspruch zur Beschreibung der Lithologie wie in Kapitel 4.2.1. bzw. in [2] aufgeführt. Niedrige Gamma-Werte deuten vor dem Hintergrund der hohen Werte der überwiegend tonigen Lithologie im Allgemeinen auf Anhydrit- und Sulfateinschlüssen und mergelige Bereiche hin und weisen deutlich Salzgesteine aus, wodurch sie in der R18 deutlich das Antreffen der Steinsalzhorizonte bei 479,25 m (R18 (1.)) bzw. 490,7 m (R18 (2.)) markieren. Innerhalb des Zechsteinsalinar treten deutlich der Rote Salzton und der Pegmatitanhydrit hervor.

Reine Sandsteine oder Sandsteine, deren niedrige Signatur durch hohe Strahlungswerte enthaltener Mineralphasen maskiert werden, wurden in der gesamten Bohrung nicht angetroffen, was auch die Bohrkernaufnahme feststellt, die eher dünne Lagen von Sandsteinen oder Wechselfolgen von Ton- und Sandsteinen im Bereich des Deckgebirges ausweist. Dennoch sind auch diese Einschaltungen in der GR-Kurve erkennbar.

Spectral Gamma Ray – Das Spektrale Gamma Ray misst ebenfalls die natürliche Gammastrahlung, unterscheidet aber darüber hinaus die Strahlungsanteile, die auf spezifische Gehalte von Kalium (⁴⁰K), Uran (²³⁸U) und Thorium (²³²Th) zurückzuführen sind. Das Verhältnis der Einzelkomponenten zueinander hilft bestimmte Mineralphasen zu identifizieren und somit lithologische und stratigraphische Informationen zu gewinnen.

In klastischen Ablagerungen kann das Spektrale Gamma helfen, z.B. Sandsteine mit einem höheren Anteil an strahlungsreichen Mineralen gegenüber Tonen zu unterscheiden oder Tonlagen in einer Umgebung höherer Hintergrundstrahlung festzustellen. Das Verhältnis von Thorium zu Kalium dient dazu, unterschiedliche Tonmineralien zu identifizieren und Rückschlüsse auf Lithologie und andere Parameter wie Permeabilität zu ziehen. In Evaporiten kann der Gehalt an Kalium in Verbindung mit Dichte und PEF (Photoelektrischer Effekt) dazu verwendet werden, verschiedene Salzmineralien zu identifizieren.

Dichte (Gamma-Gamma), Photoelektrischer Effekt (PEF) – Die Dichtemessung im Bohrloch basiert auf der Messung der Adsorption von Gammastrahlen, die von einer ¹³⁷Cs-Quelle durch das umgebende Gestein gesendet werden. Die dann durch Gamma-Bestrahlung im Gestein erzeugten sekundär-Gammastrahlen sind ein Maß für die Gesteinsdichte. Durch die Anordnung von zwei

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 47

Detektoren in unterschiedlichem Abstand wird jeweils das nähere, flache sowie das tiefere Umfeld der Bohrung erfasst. Hiermit wird qualitativ und quantitativ durch Modellrechnungen der Einfluss des Bohrlochzustands auf die Messergebnisse korrigiert.

Zusätzlich zur abgeleiteten Dichte wird der sogenannte Photoelektrische Effekt gemessen, der in Abhängigkeit der Lithologie bzw. Mineralphase einen charakteristischen Wert liefert.

Beide Messwerte werden während der Messung automatisch für die wechselnde Beeinflussung durch die Spülung zwischen Bohrlochwand und Auflagefläche der Messsonde sowie Spüldichte und Bohrlochdurchmesser korrigiert. In [13] wird von einer Reihe manueller Korrekturen und Abweichungen von erwarteten Dichten im Salz berichtet. Der Grund für die Abweichungen kann dabei nicht genannt werden.

Auch wenn die gemessenen Werte aufgrund (ton-)mineralogischer Zusammensetzung, Wechsellaagerungen, Kluffüllungen oder Beimengungen toniger, sandiger, anhydritischer und ggf. weiterer Bestandteile nicht eindeutig den typischen Gesteinsdichten der verschiedenen in der Bohrung angetroffenen Gesteine entsprechen, spiegeln sie dennoch die lithologische Situation entsprechend der Bohrkernaufnahme wieder und lassen in Verbindung mit weiteren Messkurven und der geologischen Bohrkernaufnahme eine eindeutigere Aussage zu.

Im Deckgebirgsbereich weist das Dichte-Log zunächst bis ca. 116 m relativ einheitliche Dichtewerte um $2,4 \text{ g/cm}^3$ aus. Größere Varianzen, die immer mal wieder zwischen etwa 57 – 100 m auftreten, stehen in Einklang mit lithologischer Beschreibung und geben Hinweise auf Beimengungen und/oder Kluffüllungen. Die bei 23 – 24 m erkennbare geringe Dichte korreliert mit den im Kaliber erfassten Bohrlöcherweiterungen und steht ebenfalls in räumlichen Zusammenhang mit den erfassten Spülungsverlusten in diesem Teufenbereich und markiert offensichtlich einen offenen, durchlässigen Bereich, aufgrund der angrenzend beschriebenen Anhydrite und Beobachtungen u.a. aufgrund von Oberflächenbefunden in der Umgebung ist Sulfatkarst nicht auszuschließen.

Ab ca. 116 m ist eine Abnahme der Dichte zu verzeichnen, die auch mit dem Widerstandslog korreliert. In Verbindung mit dem Litholog bzw. Bohrkernaufnahme lässt sich allerdings keine eindeutige Ursache feststellen. Es liegt die Vermutung nahe, dass es sich vermutlich nicht mehr um eine reine Tonsteinabfolge handelt.

Bei etwa 133 – 134 m lässt sich erneut eine (sehr) geringe Dichte feststellen, was häufig auf Bohrlochausbrüche in Verbindung mit deutlicher Trenn-/Bruchfläche hinweist. Diese Annahme wird gestützt durch ABI-Auswertung und die Kaliberkurve.

Unterhalb dieses Bereichs treten dann zunächst höhere Dichten zwischen $2,35 - 2,65 \text{ g/cm}^3$ auf, was zunehmenden Sandsteinanteil andeutet und sich auch im GR- und SP-Log ausdrückt. Bestätigen lässt sich diese Annahme ebenfalls durch Gegenüberstellung der Bohrkernaufnahme und der vorläufigen Einordnung dieses Bereichs als Sandsteine (Rogensteine) des Unteren Buntsandsteins bzw. nicht abschließend auszuschließen möglicherweise Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins [2].

Ab etwa 167 m wieder Kontinuität um $2,4 \text{ g/cm}^3$ mit Ausnahmen zwischen 358 – 375 m. Für diesen Teufenbereich sind im Kaliberlog Erweiterungen des Bohrlochdurchmessers verzeichnet. In wie weit möglicherweise sandigere der anhydritische Einschaltungen und/oder Einfluss von Trennflächen ausschlaggebend sind, lässt sich nicht eindeutig feststellen, u.a. da die ABI-Auswertung in diesem Bereich nicht eindeutig ist.

Eine erneute Verringerung der Dicht auf durchschnittlich $2,2 - 2,3 \text{ g/cm}^3$ wird ab etwa 425 m erkennbar. In Verbindung mit der Bohrkernaufnahme liegt ein lithologisch bedingter Einfluss durch

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 48

Auftreten von Lagen oder Klasten von Gips/Anhydrit bzw. Calciumsulfaten nahe. Der einzelne Dichteauschlag bei 451,7 m lässt sich bislang nicht eindeutig klären.

Die salinaren Abschnitte (Steinsalz) treten für den gesamten Abschnitt des Zechsteinsalinar relativ kontinuierlich mit Dichtewerten um 2,0 – 2,05g/cm³, einzelne Ausnahmen bis 2,1 g/cm³ auf.

Deutlich erkennbar sind innerhalb des Zechsteinsalinar die Durchgänge des Roten Salztons sowie des stratigraphisch jüngeren Pegmatitanhydrits ausweisen:

- ca. 585,5 – 599,5 m Roter Salzton mit Dichtewerten um 2,35 – 2,5 g/cm³,
- ca. 599,5 – 602,5 m Pegmatitanhydrit mit Dichtewerten 2,75 – 2,85 g/cm³,
- ca. 735,5 – 739 m Pegmatitanhydrit mit Dichtewerten um 2,6 – 2,65 g/cm³,
- ca. 739 – 759,5 m Roter Salzton mit Dichtewerten um 2,2 – 2,5 g/cm³.

Ebenfalls sind einzelne der insgesamt acht Anhydritlagen im Anhydritmittelsalz in dem Dichtelog bei ca. 799,5 – 801,5 m, ca. 807,5 – 809 m, ca. 810,5 m, ca. 812,5 – 813,5 m, ca. 815 m und ca. 818 – 819 m deutlich erkennbar, gleichwohl die Gesteinsdichte von Anhydrit (2,96 g/cm³) nicht erreicht wird.

Im Ergebnis einer Qualitätskontrolle der Bohrlochmessdaten des dritten Bohrlochabschnitts sowie einer petrophysikalisch-rechnerische Interpretation der effektiven Porositäten gibt es Hinweise darauf, dass die bislang durchgeführten Messwertkorrekturen zwischen flachen und tiefen Widerstand zu prüfen und die Ergebnisse der Dichtemessungen ggf. nur bedingt belastbar sind. Die Belastbarkeit betrifft hierbei weniger die Beschreibung der lithologischen Situation im Allgemeinen als vielmehr die spezifische Zuordnung einzelner Dichten für eine konkrete Gesteinsart. Der Eindruck bzgl. der Belastbarkeit bestätigt sich im Abgleich mit den an den Proben für die gesteinsmechanischen Untersuchungen ermittelten Dichtewerten, wonach die Daten der Bohrlochmessung innerhalb des Zechsteinsalinar etwas geringer erscheinen als für die vorliegende Lithologie erwartbar.

Formationswiderstand, Eigenpotential – Das eingesetzte Dual Induction Log (DIL) Verfahren nutzt ein auf Induktion basierendes Prinzip, um den elektrischen Formationswiderstand zu messen. Im Dual Induction Log sind drei verschiedene Widerstandskurven für drei Eindringtiefen RLL8C (0,33 m), RILMC (0,81 m) und RILDC (1,62 m) dargestellt. Die Messdaten wurden für Bohrlocheffekte und Spülungseigenschaften (Invasion) korrigiert.

Zusätzlich zu den Widerstandskurven stammt die SP (Spontaneous Potential, Eigenpotential) Messung von der DIL-Sonde. Diese erfasst anhand von zwei Elektroden natürliche elektrische Potentiale, die durch elektrochemische Vorgänge zwischen Formationen mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten entstehen.

Der elektrische Widerstand einer Formation wird beeinflusst durch die mineralogische Zusammensetzung, Korngrößen, Porosität und vor allem durch die Leitfähigkeit der Porenfüllung. Zusammen mit weiteren Messkurven, vornehmlich Dichte und Gamma Ray kann das Widerstandslog benutzt werden, um bestimmte Lithologien zu identifizieren und beurteilen. Die gemessenen Leitfähigkeitswerte ermöglichen die Analyse der Struktur und des Verhaltens von Porensystemen und somit auch die Identifikation permeabler Bereiche. Weiterhin gibt das Log Auskunft über die Salinität des Grundwassers in der gemessenen Formation.

Die bereits in den Dichte- und Kaliberkurven beobachtete Auffälligkeit im Bereich 23 – 24 m Tiefe ist im Widerstands-Log lediglich leicht angedeutet durch Abnahme des Widerstands bzw. leichte Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit. Erst ab etwa 25 m zeigen alle Kurven erhöhte Widerstände und dementsprechend verminderte elektrische Leitfähigkeiten. Ursächlich sind vermutlich

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 49

die gemäß Bohrkernaufnahme [2] ab 24,7 m vorhandenen und im Wechsel mit Tonsteinen auftretenden Silt- und Sandsteine sowie der zwischen 30,5 – 35,0 m beschriebene Anhydrit mit siltigen Zwischenlagen.

Mit Ausnahme einer vergleichsweise leichten Zunahme des Widerstands zwischen etwa 71,0 – 75,0 m (sulfatische Anteile vorwiegend auf Trenn-/Kluffflächen) zeigt das Widerstands-Log kontinuierlich einheitliche Werte der beschriebenen Geologie entsprechend. Ab etwa 90,5 m nehmen die Widerstände bis 112,5 m deutlich zu mit Maxima bei 100,2 – 101,5 m und 103,2 – 108,1 m. Auch in diesen Fällen ist der erhöhte Widerstand und damit die verringerte Leitfähigkeit auf die lithologische Ausprägung in diesem Bereich zurückzuführen. Gemäß Bohrkernaufnahme [12] treten ab 92,0 m zunächst zunehmend Sulfatlagen auf bzw. zwischen 96,0 – 109,0 m Anhydritlagen im Wechsel mit Tonsteinen.

Unterhalb 112,0 m ist die Kurve im Allgemeinen bis etwa 330,0 m relativ harmonisch, wobei die leicht schwankenden Widerstände/Leitfähigkeiten vermutlich die Bereiche mit häufiger auftretenden Sandsteinlagen/sandigeren Partien und damit einhergehenden lithologisch bedingten Porositätsänderungen oder evtl. auch die Einflüsse der Bohrlocherweiterungen widerspiegeln.

Die aufgrund der erheblichen Dichteabnahme sowie der Betrachtungen der Kaliber- und ABI-Auswertung vermutete Bruchfläche bei 133 – 134 m wird im Widerstandslog lediglich durch die gering in die Formation eindringende Messkurve deutlich. Anhand dessen lassen sich zunächst keine Hinweise auf Änderungen der Permeabilität erkennen, was zunächst auch keine weitere Beschreibung der vermuteten Bruchfläche und potentieller Fluidmigrationen erlaubt.

Ab etwa 360,0 m/365,0 m nimmt der Widerstand kontinuierlich langsam bis zum Antreffen des Steinsalzes ab und zeigt lediglich vermehrt kleinere Auffälligkeiten zwischen 422,0 – 435,5 m. Diese Entwicklung der Widerstandskurve hin zu höheren elektrischen Leitfähigkeiten kennzeichnet vermutlich den Einfluss der wieder zunehmenden Sandsteineinschaltungen sowie auftretender Gips- und Anhydritklasten/-lagen.

Innerhalb der Steinsalzabschnitte im Zechsteinsalinar sind durchweg hohe Widerstände und damit geringe elektrische Leitfähigkeiten zu verzeichnen. Lediglich die geringeren Widerstände zwischen ca. 585,5 – 599,5 m und 738,5 – 759,5 m zeigen den Roten Salzton an. Der Pegmatitanhydrit ist dagegen anders als im Dichtelog aufgrund seiner petrophysikalischen Eigenschaften nicht oder weniger deutlich von den angrenzenden Steinsalzbereichen zu unterscheiden. Auch die im Zuge der Bohrkernaufnahme identifizierten Anhydritlagen im Anhydritmittelsalz, die sich u.a. deutlich im Dichte-Log widerspiegeln, lassen sich im Widerstandslog nicht auskartieren.

Bohrlochakustische Messungen: Sonic (BHC) / Dipole Sonic (XDA) – Bei der Bohrung R18 wurden zwei verschiedene Messsonden eingesetzt. Die BHC-Sonde sendet Kompressionswellen alternierend an zwei Sendern aus und detektiert die transmittierten Wellen sowie potentielle reflektierte und refraktierte Wellen durch die Aufzeichnung des Wellenfeldes an mehreren Empfängern. Sie wurde in den ersten beiden Bohrlochabschnitten bis 242 m Teufe verwendet. Für den dritten bis vierten Bohrlochabschnitt, bis zur Endteufe von 900 m, wurde eine XDA Messsonde eingesetzt. Sie regt mit einer Dipolquelle P- und S-Wellen an. Quellen und Empfänger sind in zwei Richtungen angeordnet, sodass neben den P- und S-Wellengeschwindigkeiten auch die azimutale Anisotropie dieser Geschwindigkeiten bestimmt werden kann. Die bestimmten Geschwindigkeiten dienen unter anderem zur Korrelation von seismischen Daten und zur Berechnung gesteinsmechanischer Parameter, wie beispielsweise der Poissonzahl oder, gemeinsam mit der Dichte, der Berechnung dynamischer Kompressions- und Schermodule.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 50

Das Processing der XDA Daten, die Berechnung des Vp/Vs-Verhältnisses sowie der geomechanischen Kennzahlen (Poisson Zahl, Schermodul, Kompressionsmodul, Elastizitätsmodul) werden in [13] beschrieben.

Im dritten Bohrlochabschnitt, unterhalb von 456 m Teufe im Bereich des Residualgesteins, konnte auf Grund der gestörten Lagerung und den vorausgegangenen Verlustzementationen kein S-Wellensignal aufgezeichnet werden. In Bohrlochabschnitt 4 zeigen die Messdaten der P-Wellen von 523,4 m bis 717,5 m wenig Varianz. Lediglich im Bereich der Roten Salztone ab 585 m, dem Pegmatitanhydrit und dem Basissalz treten Varianzen der Laufzeitcharakteristika von den für Assesteinsalz üblichen 4550 m/s auf. Diese Beobachtung von Varianzen wiederholt sich im vierten Bohrlochabschnitt auch im tieferen Durchgang des Pegmatitanhydrits und des Roten Salztone zwischen ca. 735 m und 760 m sowie im Anhydritmittelsalz zwischen ca. 800 m und 820 m.

Nuklearmagnetische Resonanz (NMR) – Das Kernmagnetresonanz (NMR)-Messprinzip basiert auf der Wechselwirkung von Wasserstoffkernen (Protonen) mit einem starken Magnetfeld. Durch die Messung der Zeit, die es dauert, bis die Protonen ihre ursprüngliche Ausrichtung wieder annehmen (Relaxationszeit T1) oder ihre magnetischen Momente synchron werden (Relaxationszeit T2), lassen sich Informationen über die Gesamtporosität, Porengröße, Flüssigkeitsart und -verteilung ableiten (mobiles und gebundenes Wasser).

In einigen Bereichen der Bohrung wird die Messung durch Auswaschungen des Bohrlochs und Formationseffekte beeinflusst und sollte nicht oder nur mit Einschränkungen für Interpretationen genutzt werden. Diese Bereiche sind in den Composite Plots [22], [23] entsprechend gekennzeichnet. Auswaschungen im Allgemeinen, also auch wenn nicht als Störfaktor explizit markiert, können zu erhöhten Porositätswerten führen und sollten bei der Verwendung der NMR Messergebnisse Beachtung finden. Formationseffekte, die als Störfaktor für das NMR ausgewiesen wurden, werden bei der Bohrung R18 in Zusammenhang mit Störungen der lithologischen Abfolge im Residual gestellt.

Bei der Auswertung der NMR-Daten wurde generell zwischen tongebundenem Wasser („Clay Bound Water“), kapillargebundenem Wasser („Capillary Bound Water“) sowie freiem Fluid („Free Fluid Volume“) unterschieden. Es wurde die totale Porosität errechnet, die im Gegensatz zur effektiven Porosität auch das Volumen der nicht-mobilen tongebundenen Fluide miteinbezieht.

Die Auswertung der Messungen des ersten Bohrlochabschnitts (17,5 m bis 84 m, Röt/Oberer Buntsandstein) zeigt eine sehr homogene Verteilung der totalen Porositäten, die in etwa bei 10 % liegen (überwiegend clay bound water). Freies Fluid ist nur sehr sporadisch zu beobachten und erreicht nie Werte über 3 %.

Für den zweiten Bohrlochabschnitt (NMR-Messbereich 90 m bis 245 m) zeigen die Messdaten im oberen Bereich (Oberer Buntsandstein) totale Porositäten bei Werten vergleichbar mit Bohrlochabschnitt 1. Im ebenfalls im zweiten Bohrlochabschnitt erbohrten Unteren Buntsandstein liegen die Werte zwischen 10 und 20 % mit einem Maximum bei 130 m Teufe mit 25 %. In diesem Bereich (120 m bis 140 m) sind Anteile an freiem Fluid zu beobachten. Unterhalb 170 m Teufe bis Sektionsende im Unteren Buntsandstein stellen sich die totalen Porositäten sehr homogen mit einem Spektrum zwischen 4 und 12 % dar.

Im dritten Bohrlochabschnitt (Messbereich 246 m bis 485 m) zeigt der Untere Buntsandstein weiterhin homogene totale Porositäten zwischen 10 und 20%. Eine Abnahme des freien Fluid ist im oberen Bereich bis etwa 280 m zu sehen. In den Abschnitten zwischen 328 m und 345 m sowie zwischen 395 m bis 400 m (Top) lassen sich erhöhte Anteile an freiem Fluid beobachten. Für den Bereich des Residualkomplexes werden totale Porositäten bis zu 30 % ausgewiesen, allerdings ist die Messung hier, vor allem die Interpretation der freien Fluide, auf Grund hohem Aufkommens an

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 51

Formationseffekten und z.T. starker Auswaschungen als nicht eindeutig und eben durch die Gegebenheiten als beeinflusst zu betrachten.

Die Qualitätskontrolle der Bohrlochmessdaten des dritten Bohrlochabschnitts sowie die petrophysikalisch-rechnerische Interpretation der effektiven Porositäten (PHIE) zeigen ein Wertespektrum bis maximal 5 %, die Schwelle von 3 % wird nur selten überschritten. Somit kann dieser Bereich auf dieser Datengrundlage als annähernd impermeabel betrachtet werden. Im Vergleich hierzu zeigt der Packertest i4 (vgl. Kapitel 4.4.2), 450,70 - 483,00 m u. GOK) mit einem Best-Fit-Wert für k_f von $2,50 \cdot 10^{-7}$ m/s und einer entsprechenden Transmissivität von $8,10 \cdot 10^{-6}$ m²/s ebenfalls niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte. Die Ergebnisse des Packertest i4 zeigen dabei im Vergleich mit den anderen Testintervallen der R18 die höchste Durchlässigkeit und Transmissivität.

Für den vierten Bohrlochabschnitt (Messbereich 525 m bis 719 m) sind die Aussagen hinsichtlich der freien Fluide für den direkten Bereich unterhalb des Rohrschuhes (ca. 522 m) bis ca. 541 m durch Kalibererweiterungen verfälscht. Unterhalb davon bleiben die totalen Porositäten konstant zwischen 5 bis 10 %. Lediglich der Rote Salzton zwischen 585 m und 600 m zeigt demgegenüber leicht erhöhte Werte, welche auf die Präsenz von tongebundenem Wasser zurück zu führen sind.

Auch bei dem weiteren Messeinsatz im vierten Bohrabschnitt (Messbereich 723 m bis 900 m) zeigen die Ergebnisse der NMR-Messung eine homogene Verteilung der totalen Porositäten im Bereich kleiner 10 %. Im Roten Salzton zwischen 744 m und 760 m konnten wegen Auswaschungen keine NMR Daten aufgezeichnet werden.

Bohrlochimage: Akustischer TelevIEWer (ATV) / Acoustic Borehole Imager (ABI) – Der akustische TelevIEWer wird eingesetzt, um hochauflösende akustische Bilder der Bohrlochwand zu erfassen. Es sendet Schallwellen aus und erfasst die reflektierten Signale, um detaillierte Bilder der geologischen Strukturen, Risse und Schichtungen entlang des Bohrlochs zu erstellen. Diese Bilder liefern wertvolle Informationen über die Beschaffenheit der Formationen und ermöglichen die Berechnung und Analyse gesteinsmechanischer Parameter. Erläuterungen zum Processing der ABI Daten sind in [13] beschrieben.

Zur Bestimmung des Schichteinfallens sowie der Trennflächenorientierung ist die Bohrung über alle Bohrabschnitte mit einem akustischem Bohrloch TelevIEWer (ATV) vermessen worden. Die in diesem Absatz zusammengefasste Interpretation beruht auf automatisiert gepickten Strukturmarkern von [13], [20], [21] und einer BGE-internen Plausibilitätsprüfung. Die genaue Datenbearbeitung ist dem Messbericht [13] zu entnehmen.

Im Ergebnis der Plausibilitätsprüfung lässt sich feststellen, dass die im Zuge der Datenbearbeitung angewendete Klassifizierung von Klüften durch den Autopicker insbesondere im Salzgestein aber auch über z.T. weite Abschnitte im Deckgebirge (häufig) nicht zutreffend bzw. die automatisierte Interpretation nicht verlässlich ist. Aussagen zu Klüftöffnungen bzw. Aussagen zu Klüftöffnungsweiten sind kritisch zu hinterfragen, da davon auszugehen ist, dass Klüfte im Salzgestein i.d.R. gefüllt sind, ggf. mit akustisch weichen Materialien. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wird nachfolgend an der Strukturmarkerklassifizierung festgehalten.

Entlang des ersten Bohrabschnitts traten im Bereich des Rohrschuhs magnetische Anomalien auf, sodass hier erst ab einer Teufe von 20 m gemessen werden konnte. Darüber hinaus konnte im zweiten Abschnitt erst ab 88,8 m gemessen werden und im Bereich von 118,8 m bis 124,8 m Teufe war aufgrund der schlechten Datenqualität (ggf. in Verbindung mit den in diesem Bereich verzeichneten Bohrlocherweiterungen) keine Auswertung möglich.

Hinsichtlich der akustischen Gesteinshärte ist der Deckgebirgsbereich von Gesteinseinheiten z.T. unterschiedlicher Gesteinshärte gekennzeichnet. In einzelnen Fällen sind lediglich weichere Zwi-

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 52

schenlagen in längeren Abschnitten erkennbar bzw. weisen die Werte auf die Präsenz von Filterkuchen hin. Aber auch längere Abschnitte, ab etwa 330 m, sprechen aufgrund der gemessenen Werte für weichere Gesteinseinheiten. In wie weit sich Effekte der Schichtlagerung und das Vorhandensein von Trennflächen darauf auswirkt, wurde nicht betrachtet.

Im Bereich des Deckgebirges lassen sich im Unteren Buntsandstein verschiedentlich spannungsbedingte Bohrlochausbrüche beobachten, insbesondere in den Teufen von 251 m bis 256 m, 331 m bis 334 m, 351 m bis 356 m und 377 m bis 385 m. Weiterhin können Falten im Gestein zu erkennen sein (335,1 m und 337,9 m Teufe).

Auch der als Residual angesprochene Gebirgsbereich lässt sich vom unteren Bereich des Deckgebirges (Unterer Buntsandstein) hinsichtlich der Gesteinhärte nicht unterscheiden. Aufgrund der überwiegend als plastisch beschriebenen Bohrkerne aus diesem Bohrlochabschnitt lässt sich dennoch die Einschätzung weicher Gesteinseinheiten bestätigen.

Deutlich härter erscheinen die Steinsalzbereiche sowie auch die Durchgänge des Pegmatitanhydrits und den Anhydritlagen im Anhydritmittelsalz. Lediglich der Rote Salztön sticht mit deutlich geringeren Gesteinhärten heraus. Die akustisch weichen Tonsteine des Roten Salztöns sind stark geklüftet, wobei die Klüfte im Bereich von 753 m bis 759 m Teufe über mehrere Zentimeter nur sehr geringe akustische Härten mehr gemessen werden konnten. Lediglich vereinzelte als Kluffüllung angesprochene Strukturen zeigen eine akustisch harte Füllung.

Im Deckgebirge lassen sich sowohl für den Oberen als auch den Unteren Buntsandstein mehrfach Änderungen der Einfallrichtung von NNW-NNE-NE bis SSW-S-SSE-SE mit ebenfalls immer wieder variierenden Einfallswinkeln (flach – steil) erkennen. In Einzelfällen sind die Umbiegungen und Faltenachsen mehr oder weniger deutlich im ABI zu erkennen. Häufig ist das Image in den betreffenden Bereichen eher schlecht aufgelöst (bedingt durch Kalibererweiterungen, Lithologie oder andere Effekte) und lässt ggf. bei Gegenüberstellung weiterer Messkurven und/oder in der Gesamtschau auch strukturgeologische Einflüsse und tektonische Elemente vermuten. Die Beobachtungen des ABI zu den Raumlagen der Schichtflächen sind in Tabelle 15 zusammengefasst und können in [20], [21] nachverfolgt werden.

Tabelle 15: Zusammenfassende Übersicht der im Deckgebirge anhand ABI-Auswertung beobachteten Schichteinfallrichtungen und -winkel.

Geologische Einheit	Teufenbereich [m]	Schichteinfallrichtung	Einfallswinkel
Oberer Buntsandstein	16 – 35	NNW bis NE	Stark variierend zwischen 25° – 80°
	35 – (46,6)	SSW bis SSE	40° – 60°
	47 – 55/65	N bis NE	40° – 50°
	65 – 107	SSW bis SSE	Variierende Einfallswinkel bis z.T. 80°
Gestörter Bereich zwischen Oberen und Unteren Buntsandstein	107 – 134,5	Keine verlässliche Interpretation bzw. Interpretation mit Unsicherheiten behaftet	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 53

Geologische Einheit	Teufenbereich [m]	Schichteinfallsrichtung	Einfallswinkel
Unterer Buntsandstein	135 – 263,3	NE	20° – 30°, ab 144 m 40° – 50°, ab 255 m 20° – 30°
	263,3 – 304,4	SW bis SE	Abschnittsweise 5° – 15°
	304,4 – 312,5	+/- E	20° – 40°
	312,5 – 335,1	NE	60° – 70°
	335,1 – 337,9	SE	60° – 75°
	337,9 – (370)	NE	50° – 70°
	(370) – 394	SSW bis SSE	15° – 25°
	394 – 410	SE bis ESE	15° – 30°
	410 – 418	ENE bis NE	25° – 35°
Ab 418 m keine eindeutige Interpretation möglich			

Auch im Zechsteinsalinar lässt sich ein häufiges Wechseln der Schichteinfallsrichtungen mit variierenden Einfallswinkeln feststellen (siehe [20], [21]). In Ergänzung zu den automatisierten Auswertungen von [13] wurde durch BGE das Einfallen von Schichtung und Schichtgrenzen im Intrasalinar manuell bestimmt. Hierbei wurden zunächst die Lage der Schichtgrenzen aus dem Bohrbericht entnommen. Darauf aufbauend wurde sowohl eine Einschätzung zum Einfallen als auch eine visuelle Charakterisierung der Schichtgrenze anhand der Kernfotos [11] vorgenommen. Im Anschluss wurde die Lage der Schichtgrenze auf Basis der Kernfotos im ATV-Log identifiziert und deren Einfallswinkel und -richtung bestimmt. Die Ergebnisse der BGE-internen Auswertung sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Manuell am akustischen Bohrloch Televiwer Log bestimmte Einfallsrichtungen und Einfallswinkel der innerhalb des Zechsteinsalinar modellierten Schichtgrenzen und Schichtungen mit Teufen auf Grundlage ABI-Messung [13].

Lokation Messung und Art (Grenze, Übergang, Schichtung)	Bezeichnung BGE	Teufe [m]	Einfallrichtung [°]	Einfallswinkel [°]
Grenze Roter Salzton zu Pegmatitanhydrit	z4RT_z4PA	599,9	150,48	73,35
Grenze Pegmatitanhydrit zu Rotem Salzton	z4PA_z4RT	738,85	260,59	66,1

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 54
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Lokation Messung und Art (Grenze, Übergang, Schichtung)	Bezeichnung BGE	Teufe [m]	Einfalls- richtung [°]	Einfalls- winkel [°]
Grenze Roter Salztou zu Tonmittelsalz	z4RT_z3TM	759,7	244,02	21,29
Grenze Schwadensalz zu Anhydritmittelsalz	z3SS_z3AM	798,05	284,69	30,03
Übergang Schwadenmittelsalz zu Anhydritmittelsalz	z3SS_z3AM	799,86	296,74	44,69
Übergang Schwadenmittelsalz zu Anhydritmittelsalz	z3SS_z3AM	801,73	289,21	40,66
Übergang Anhydritmittelsalz zu Buntem Salz	z3AM_z3BT	819,13	358,52	33,29
Übergang Anhydritmittelsalz zu Buntem Salz	z3AM_z3BT	819,23	331,97	44,57
Grenze Ronneberg Horizont und Banksalz zu Orangesalz	z3RO-z3BK_z3OS	828,96	281,8	45,61
Schichtung Liniensalz	z3LS (Schichtung)	861,65	357,05	51,39
Schichtung Liniensalz	z3LS (Schichtung)	869,66	2,95	63,33
Schichtung Liniensalz	z3LS (Schichtung)	882,5	283,28	60,95

Temperatur, Spülungswiderstand, Kabelkopfspeunung (TCMRT) – Mit Ausnahme von NMR- und ATV-Messungen wird die Temperatur im Bohrloch bei allen Messeinfahrten zusätzlich zur Kabelspannung und des elektrischen Widerstands der Spülung erfasst. Von den Spülungswiderständen, die mittels TCMRT-Sonde bei jeder Einfahrt gemessen wurden, wurden jeweils die Daten der ersten Einfahrten verwendet.

In Bohrlochabschnitt 1, die mit einer wasserbasierten Spülung gebohrt wurde, liegt die Leitfähigkeit der Spülung bei ca. 5 mS/cm. Im weiteren Verlauf der Bohrung wurde die Spülung ab Abschnitt 3 auf ca. 200 mS/cm aufgesalzen, in den Salzstrecken wurde mit gesättigter Spülung gebohrt (annähernd 400 mS/cm).

Generell sind kaum lokale Schwankungen in der Spülungsleitfähigkeit zu erkennen (Composite Log R 18_2, [23]). Im Composite Log R18_1 [22] ist ab einer Teufe von ca. 280 m eine schlechende Abnahme der Leitfähigkeit bis zu einem Minimum von ca. 100 mS/cm bei ca. 345 m Teufe zu beobachten. Parallel dazu lassen sich in der Auswertung des ABI in den Abschnitten von ca. 280 – 285 m, 295 – 300 m sowie 310 – 335 m eine Vielzahl von offenen, weiten bis dünnen Klüften sowie teilweise offenen, mit weicher Kluffüllung versehenen Klüften feststellen. In den Kernbeschreibungen werden für diese Abschnitte Klüfte und Brüche, teilweise mit Anhydrit und Sulfatfüllung versehenen, offene bis teilweise geöffnete Klüfte neben schichtparallelen Brüchen und Querbrüchen beschrieben.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 55

4.3.3 EMR-Messungen

Das Ziel der richtungssensitiven EMR-Messung ist die Erfassung struktureller geologischer Elemente in Form von Radarreflexionen im Umfeld der Bohrung. Die Messungen können methodenbedingt nur im unverrohrten Bereich durchgeführt werden, da zudem für eine erfolgreiche Messung die Bohrspülung auf eine nichtleitende Ölspülung (Dichte 1,25 kg/l) umgestellt werden muss, erfolgte die Radarmessung im Teufenbereich zwischen 520 – 800 m. Aufgrund der Druckfestigkeit der Sonden von maximal 100 bar konnte die Bohrung nicht bis zu ihrem Tiefsten sondiert werden.

Eingesetzt wurden Sonden mit 50 und 250 MHz Mittenfrequenz. Durch den Einsatz der beiden Sonden soll ein hochauflösendes Strukturabbild im Nahbereich der Bohrung sichergestellt werden (250 MHz Sonde), bei gleichzeitiger hoher Erkundungsreichweite (50 MHz Sonde). Die Feldmessung ist im Feldbericht [14] beschrieben, die Auswertung der Daten erfolgte im engen Austausch mit der BGE durch die BGR und ist im Abschlussbericht [24] beschrieben.

Die Messdaten wurden mit Aufzeichnungslängen von 16 μ s bzw. 4 μ s und Abtastraten von 1 ns bzw. 0,5 ns mit einem Messpunktabstand von 1 m bzw. 0,5 m aufgezeichnet. Grundlegende Korrekturen (Geometriezuordnung und die Korrektur der Vorverstärkungsstufen) erfolgten durch den Auftragnehmer. Eine ergänzende Datenbearbeitung erfolgte seitens BGR und beinhaltete eine Nullpunktjustage, eine Frequenzfilterung, einen Dämpfungsausgleich sowie eine gleitende Amplitudenskalierung (AGC) zur verbesserten Reflektordarstellung. Zusätzlich bearbeitete die BGE die Daten mit einer Rauschunterdrückung sowie einer adaptiven Hintergrundrauschunterdrückung, Diese Daten wurden von der BGR zur Identifikation der Reflexionen verwendet, wobei die Bestimmung der Reflexionswinkel jedoch auf Basis der von der BGR bearbeiteten Daten erfolgte. Diese Bearbeitung umfasste keine Mehrspurfilterprozesse, sodass die räumlichen Informationen unverfälscht sind.

In der Auswertung der Daten zeigt die 250 MHz Sonde starke Überlagerungen durch Störwellen ab ca. 250 ns, siehe Abbildung 7. Diese wurden durch die BGE-Bearbeitung effektiv unterdrückt, unterliegende Reflexionen wurden somit sichtbar gemacht (siehe Abbildung 8). Die Daten der 250 MHz Messung wurden durch die BGR bis in eine Entfernung von ca. 250 ns (~15,5 m) ausgewertet, bei der 50 MHz Messung konnten Reflexionen bis ca. 5000 ns (~310 m) Entfernung ausgewertet werden (Abbildung 6).

Die durch die BGR interpretierten Reflexionen wurden hinsichtlich ihres Ursprungswinkels (Azimut) ausgewertet und durch die Wellenfeldrekonstruktionsmethode an ihren wahren Reflexionsort migriert. Anschließend wurden die sich ergebenden Reflektorelemente an die BGE übergeben. Diese Daten wurden vor allem für die strukturgeologische Interpretation des Salinarbereichs um die R18 verwendet (siehe Kapitel 5.2.3). Die in Kombination durchgeführt 50 und 250 MHz Messung in Kombination hat eine große Erkundungsreichweite bei gleichzeitiger hoher Auflösung in Bohrungsnähe ermöglicht.

Der Ursprung der starken Störwellen bei der 250 MHz Messung konnte nicht geklärt werden. Im Falle zukünftiger Messeinsätze sollte der Einfluss der beschwerten Ölspülung auf die Messungen und die Sonden untersucht werden.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 56

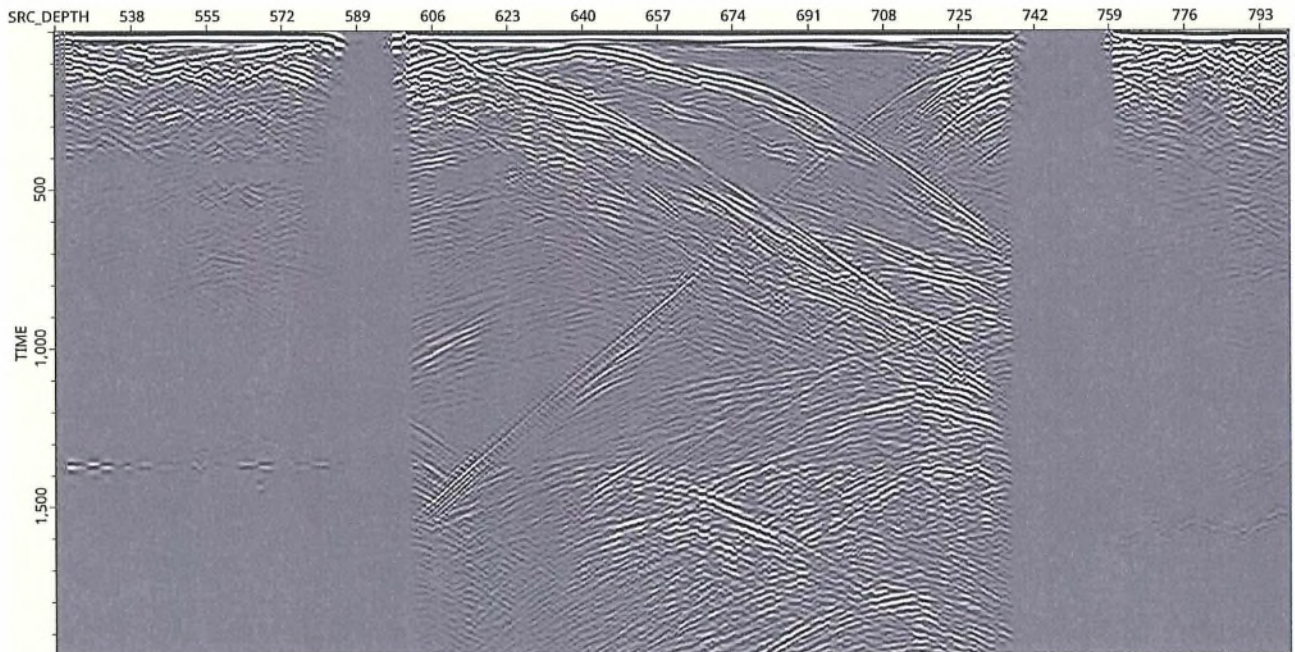


Abbildung 6: Bearbeitetes Radargramm des Dipol der 50 MHz Sonde bis 2000 ns.

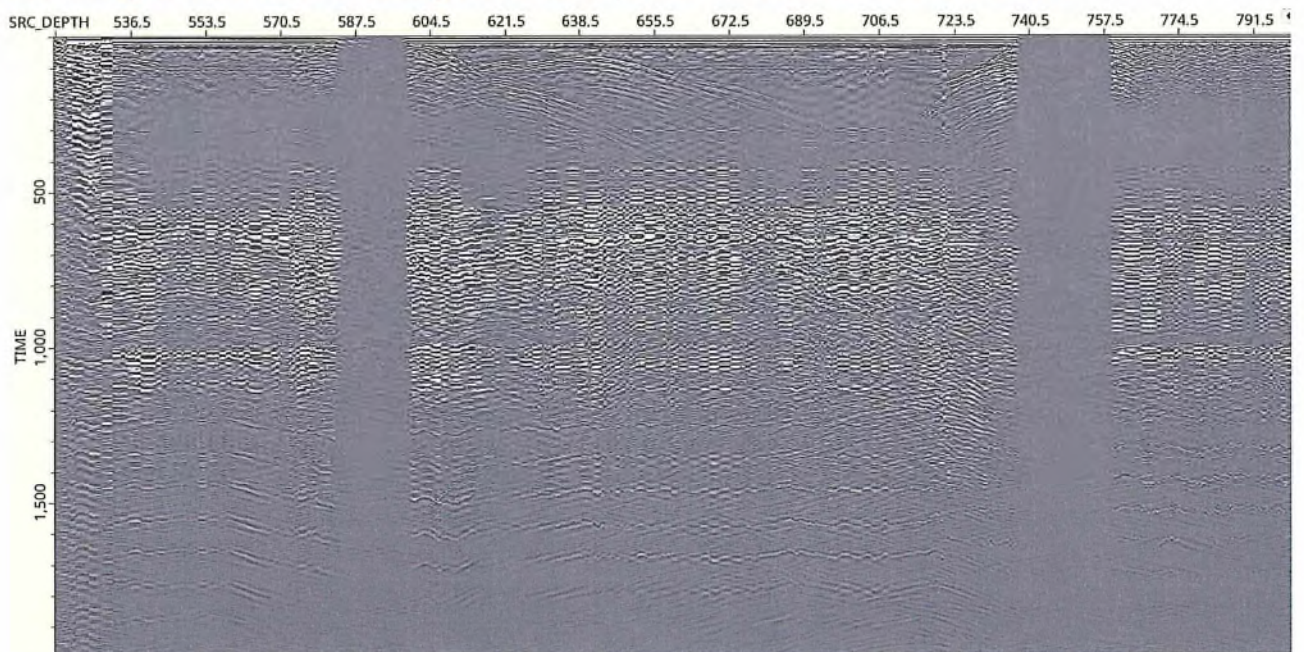


Abbildung 7: Radargramm des Dipol der 250 MHz Sonde bis 2000 ns ohne Unterdrückung der Störwellen.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 57

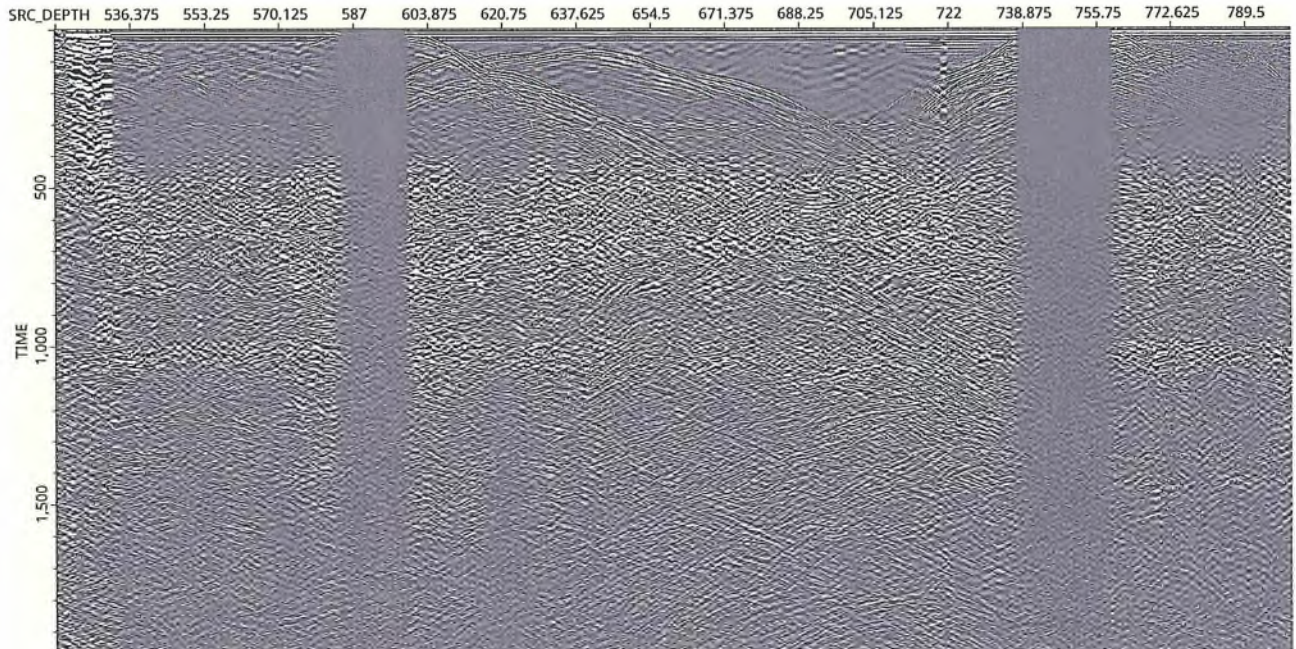


Abbildung 8: Bearbeitetes Radargramm des Dipol der 250 MHz Sonde bis 2000 ns.

4.3.4 Bohrlochseismik

Die Bohrlochseismik (Vertical Seismic Profiling, VSP) dient der kontinuierlichen Bestimmung von P- und S-Wellengeschwindigkeiten entlang des Bohrpfad es sowie der Abbildung von seismischen Reflexionen im Nahbereich der Bohrung.

Die gewonnenen Daten wurden unter der Verwendung eines HEMI7 Vibrators und eines einzelnen BGK 1000-H 3-Komponenten 15-Hz-Bohrlochgeophons (3-Komponenten-Geophone mit zusätzlichem Hydrophonsensor) aufgezeichnet. Der Abstand Vibrator – Bohrlochmund wurde so kurz wie möglich gehalten, die Aufstellung des Vibrators erfolgte auf der Zuwegung vor dem Bohrplatz in einem Abstand von 68,5 m, es wurde ein breitbandiger Sweep von 10 - 120 Hz mit einer Länge von 30 s und einer zweifachen Stapelung verwendet. Die Daten wurden mit 2 ms bis zu einer Aufzeichnungsdauer von 2 s und einer räumlichen Abtastrate von 5 m bis zu einer Tiefe von 825 m aufgezeichnet. Die maximale Sondierungstiefe wurde durch die Messkabelänge limitiert.

Die Auswertung der P-Wellen-Daten erfolgte durch die DMT und ist in [15] beschrieben. Der Bericht umfasst sowohl die Dokumentation der Messung, als auch die P-Wellengeschwindigkeitsauswertung aus der Vertikalkomponente sowie die Erzeugung eines Corridorstacks. Zusätzlich erfolgte eine Auswertung der Horizontalkomponenten durch die BGE in Eigenleistung. Abbildung 9 zeigt die Darstellungen aller Komponenten der VSP-Messung mit den P- und S-Ersteinsätzen. Die P-Ersteinsätze sind von guter bis sehr guter Qualität. Die Scherwelleneinsätze sind ab einer Tiefe von ca. 130 m von guter Qualität, für flachere Bereiche konnten keine S-Welleneinsätze bestimmt werden. Hierzu wurden synthetische S-Welleneinsätze aus den P-Wellenersteinsätzen mit einem v_p/v_s Verhältnis von $\sqrt{3}$ bestimmt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 58

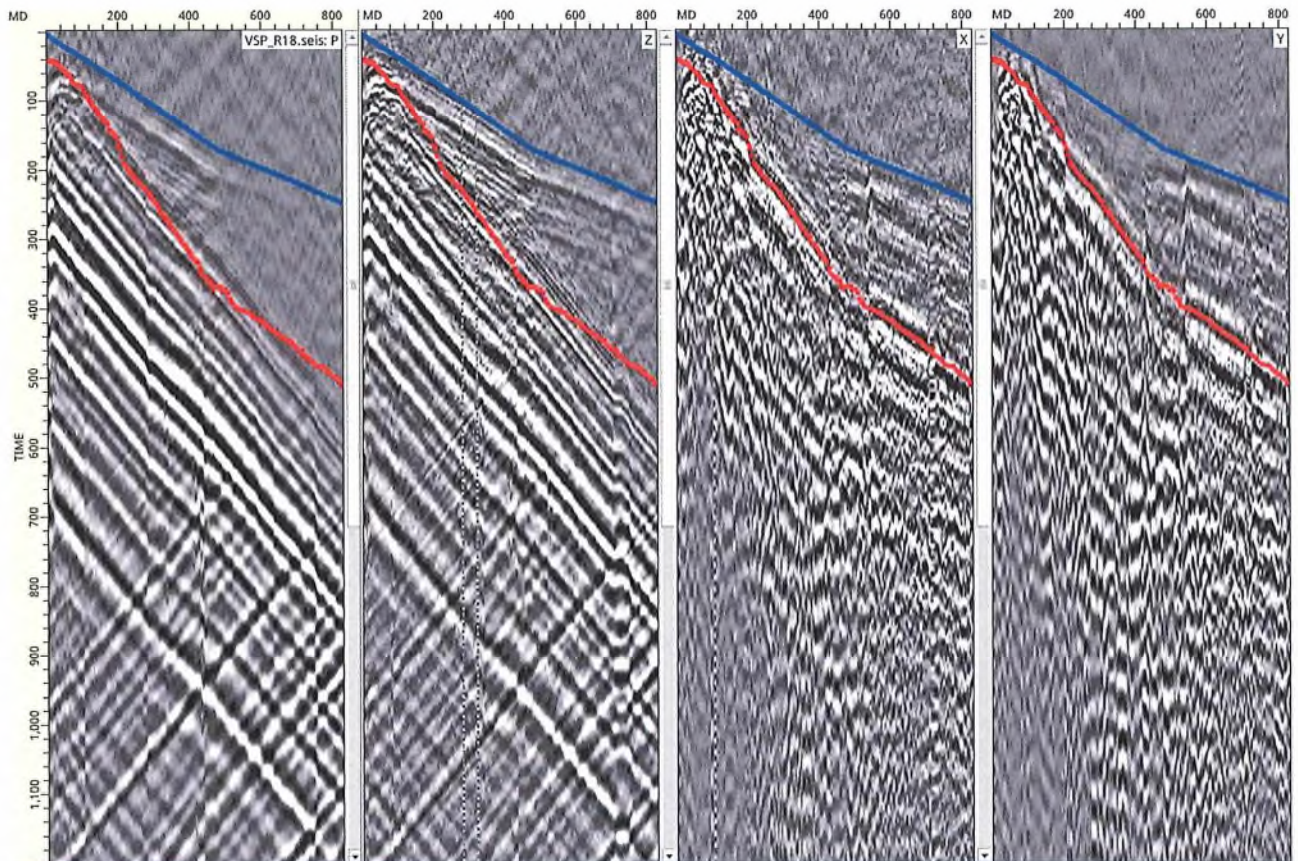


Abbildung 9: VSP Daten für die Komponenten, von links nach rechts: Hydrophon, Vertikal, X, Y mit überlagerten Ersteinsätzen für die P-Welle (blau) und S-Welle (rot).

Die Bearbeitung der Schwerwellendaten beschränkte sich auf eine Rauschunterdrückung sowie einen 50 Hz-Störwellenfilter. Äquivalent zur Bestimmung der P-Wellenersteinsätze wurde das positive Maximum für den Schwerwellenersteinsatz gepickt. Der Pick erfolgte entweder auf der X- oder der Y-Komponente in Abhängigkeit der Signalstärke, siehe Abbildung 9.

Aus den S-Welleneinsätzen wurden S-Wellengeschwindigkeiten bestimmt. Aus diesen konnte zusammen mit den P-Wellengeschwindigkeiten die Poissonzahl ν und das v_p/v_s -Verhältnis für jeden Tiefenpunkt berechnet werden.

Im Vergleich zum Sonic-Log, siehe Kapitel 4.3.2, wurde ein lückenloses Geschwindigkeitsprofil bis zu einer Teufe von 825 m gewonnen. Die Geschwindigkeitstrends der Sonic- und VSP-Geschwindigkeitsmessungen bestätigen sich, wobei das Sonic Log methodenbedingt höher aufgelöst ist und dahingegen das Geschwindigkeitsprofil der VSP weniger durch bohrlochnahe Heterogenitäten beeinflusst ist.

Die aus den durch die VSP bestimmten seismischen Geschwindigkeiten berechnete Poissonzahl, bzw. das v_p/v_s -Verhältnis zeigt im Deckgebirge einige Anomaliezonen mit erniedrigten Scherwellengeschwindigkeiten bei gleichzeitig nicht auffälligen P-Wellengeschwindigkeiten. Die in Tabelle 17 gezeigten Gebirgsbereiche weisen hohe bis sehr hohe Poissonzahlen von 0,29 bis zu 0,38 auf. Die restlichen Bereiche weisen v_p/v_s -Verhältnis um $\sqrt{3}$ bzw. Poissonzahlen um 0,19 auf, was unauffällige, erwartbare Werte für triassische Sedimente darstellt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 59

Tabelle 17: Zusammenfassung der mittels VSP anhand der Poissonzahl bzw. v_p/v_s -Verhältnis identifizierten Anomaliezonen im Deckgebirge.

Teufenbereich [m]	v_p/v_s -Verhältnis	Poissonzahl
135 – 155	2,0 – 2,1	0,29 – 0,31
155 – 175	2,1 – 2,5	0,31 – 0,37
175 – 185	2,0 – 2,1	0,29 – 0,31
345 – 360	2,0 – 2,3	0,29 – 0,34
390 – 460	2,0 – 2,6	0,29 – 0,38

4.4 Hydrogeologische Packertests

4.4.1 Messprogramm und Messdurchführung

Im Ergebnis der hydrogeologischen Packertests (PT) wurden folgende Parameter mit den Versuchen bestimmt:

- hydraulische Druckhöhe, möglichst unbeeinflusst von Bohr- und Bohrspülungs-Effekten,
- Transmissivität und hydraulische Durchlässigkeit,
- Eingrenzung des Speicherkoeffizienten,
- Formationsdruck, Frischwasserdruckhöhe,
- Einschätzung der Strömungsgeometrie und Randbedingungen.

Sofern die Gegebenheiten es zugelassen haben, wurden Wasserproben aus einzelnen Testintervallen zur chemischen Analyse genommen.

Auf Grundlage der genannten Parameter lassen sich Aussagen über die Durchlässigkeit der Gesteine in den getesteten Bereichen treffen und Rückschlüsse auf das Umfeld der Bohrung und das Fließmodell ableiten. Anhand der Parameter kann eine Zuordnung zu Grundwasserleiter- und Grundwassergering- oder -nichtleiterbereichen erfolgen. Abschnitte mit verstärkter Grundwasserzuströmung können konkret ausgewiesen werden.

Auf der Basis von bohrtechnischen, lithologischen (vgl. Kapitel 4.2) und geophysikalischen Daten (vgl. Kapitel 4.3.2) wurden sieben Bohrlochbereiche für hydraulische Packertests ausgewählt. In diesen sieben Abschnitten wurden hydraulische Versuche mit Einfach- und Doppelpackersystemen durchgeführt. Ergänzend konnten in drei Bereichen zudem Wasserproben entnommen werden (vgl. Kapitel 4.7.2). Eine Übersicht der einzelnen Testintervalle sowie der Dauer, Art und stratigraphischen Zuordnung ist in Tabelle 18 dargestellt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 60
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 18: Zusammenstellung der hydraulischen Packertests in der Erkundungsbohrung R18.

Test-intervall	Tiefe [m]	Testzeit-raum ¹⁾	Testdauer [h] ²⁾	Testart	Stratigraphie ⁵⁾
R18-E1-i1	54,00 – 85,00	26.10.2023	14,75	Einfach-packer ³⁾	Oberer Buntsandstein (so)
R18-E2-i2	149,00 – 171,18	04.12.2023 – 05.12.2023	25,12	Doppelpacker inkl. Wasserprobe	Untere Buntsandstein (su)
R18-E2-i3	113,00 – 135,18	06.12.2023	19,20	Doppelpacker	Mittlerer(?) bis Unterer Buntsandstein (sm-su)
R18-E3b-i4	450,70 – 483,00	06.02.2024 – 07.02.2024	21,95	Einfach-packer inkl. Wasserprobe	Residualgebirge (cr)
R18-E3-i5 ³⁾	366,00 – 391,09	25.01.2024 – 26.01.2024	23,58	Doppelpacker	Unterer Buntsandstein (su)
R18-E3-i5b ⁴⁾	365,90 – 390,99	26.01.2024 – 27.01.2024	24,97	Doppelpacker inkl. Wasserprobe	Unterer Buntsandstein (su)
R18-E6-i6	739,50 – 760,14	19.05.2024 – 21.05.2024	53,88	Doppelpacker	Roter Salzton (z4RT)

¹⁾ Zeitraum der hydraulischen Testarbeiten ohne Einrichtung und Installation

²⁾ Testdauer zwischen Anschluss der Packer an den Drucktank und Beginn des Entspannens der Packer

³⁾ In Doppelpackerkonfiguration eingebaut ohne den unteren Packer zu spannen

⁴⁾ Aufgrund einer Fehlfunktion der Moyno-Pumpe wurde der Test im Testintervall i5 unterbrochen und nach Ausbau der Pumpe als Test im leicht versetzten Testintervall i5b fortgesetzt

⁵⁾ auf Grundlage vorläufiger stratigraphischer Einordnung (vgl. Kapitel 4.2.4)

Die Dauer der Bohrlochdruckgeschichte im Testintervall vom Durchbohren des Intervallmittelpunkts bis zum Beginn der hydraulischen Testarbeiten ist in Tabelle 19 gezeigt. Diese Bohrlochdruckgeschichte wurde sofern möglich und notwendig bei der numerischen Auswertung der Packertests berücksichtigt.

Tabelle 19: Dauer der Bohrlochdruckgeschichte in der Erkundungsbohrung R18.

Intervall	Teufe [m]	Länge [m]	Intervall-mittelpunkt [m u. GOK]	Bohren durch Intervall-mittelpunkt	Beginn der hydraulischen Testarbeiten	Dauer [h]
R18-E1-i1	54,00 – 85,00	31,00	69,50	24.10.2023 01:20	26.10.2023 08:20	55,00
R18-E2-i2	149,00 – 171,18	22,18	160,09	24.11.2023 20:35	04.12.2023 22:32	241,95
R18-E2-i3	113,00 – 135,18	22,18	124,09	22.11.2023 06:25	06.12.2023 04:43	334,00

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 61
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Intervall	Teufe [m]	Länge [m]	Intervall-mittelpunkt [m u. GOK]	Bohren durch Intervall-mittelpunkt	Beginn der hydraulischen Testarbeiten	Dauer [h]
R18-E3b-i4	450,70 – 483,00	32,30	466,85	30.01.2024 01:00	03.02.2024 05:30	184,72
R18-E3-i5	366,00 – 391,09	25,09	378,545	13.01.2024 08:45	25.01.2024 04:14	283,40
R18-E3-i5b	365,90 – 390,99	25,09	378,445	13.01.2024 08:45	26.01.2024 13:02	316,28
R18-E6-i6	739,50 – 760,14	20,64	749,82	10.05.2024 21:05	19.05.2024 06:37	201,53

Nachfolgend sind die Ergebnisse der durchgeführten hydraulischen Packertests in den sieben Tiefenbereiche entlang der Erkundungsbohrung R18 zusammengefasst. Eine ausführlichere Darstellung und Beschreibung der Tests sowie der Ergebnisse erfolgt in [16]. Die Auswertungen der Packertests sind detailliert in den jeweiligen Intervallberichten [25], [26], [27], [28], [29], [30] enthalten.

4.4.2 Ergebnisse

Bei allen sieben Packertests konnten mittels analytischer und numerischer Auswertung belastbare hydraulische Parameter (Transmissivität bzw. hydraulische Durchlässigkeit sowie Formationsdruck bzw. Süßwasserdruckspiegelhöhe) abgeleitet werden, und es ergeben sich Abschätzungen zu den Fließverhältnissen und Randbedingungen („Fließmodelle“). Die bestimmten hydraulischen Parameter sind in Tabelle 20 und Tabelle 21 sowie Tabelle 22 zusammengefasst.

Zu beachten ist, dass anhand der analytischen und numerischen Auswertung der Packertests jeweils die Transmissivität T bestimmt wird, die dann über die Länge des Testintervall L in eine hydraulische Durchlässigkeit k_f umgerechnet wird. Aus diesem Grund entspricht der errechnete k_f -Wert einer mittleren hydraulischen Durchlässigkeit über das Testintervall.

In Intervallen mit heterogenen Formationen, wie hier in der Erkundungsbohrung R18, kann der errechnete, mittlere k_f -Wert kleiner sein als der k_f -Wert von einzelnen, höherdurchlässigen Abschnitten innerhalb des Testintervalls, wie z. B. einer Kluft oder Störungszone. Bei der Auswertung der Packertests und der Abschätzung der Formationsparameter werden deshalb geologische Angaben zu möglichen hydraulisch wirksamen Abschnitten bzw. Strukturen einbezogen. Darüber hinaus werden auch die hier beobachteten, z. T. komplexen hydraulischen Randbedingungen berücksichtigt.

Für die einzelnen Packertests in der Erkundungsbohrung R18 lassen sich auf Grundlage der verschiedenen Bedingungen die im Folgenden ausgeführten Einschätzungen zu den erfassten Parameterwerten geben.

Packertest i1 (54,00 – 85,00 m) umfasst mit dem Testintervall von 31,00 m rotbraune, meist geschichteten, mittelharten bis harten Tonstein des Oberen Buntsandsteins (Röt 1) der Südflanke. Teilweise sind die Tonsteine geklüftet und mit sekundärem Sulfat verheilt. Zur Basis hin ist eine zerscherte Zone erkennbar. Aufgrund unklarer Bedingungen (Spülungsverluste) im Bohrloch wurde eine Doppelpackergarnitur in das Bohrloch eingeführt, aber der Test zunächst als Einzelpa-

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 62

ckertest gegen die Sohle durchgeführt. Im Falle einer hohen Durchlässigkeit für das gesamte Testintervall i1 hätte zur Eingrenzung des Gebirgsbereiches, der durch eine höhere hydraulische Durchlässigkeit charakterisiert ist, ein zusätzlicher Test mit Doppelpackergarnitur gefahren werden können. Die Spülungsverluste scheinen sich allerdings auf einen Bereich oberhalb des Testintervalls beschränkt zu haben, wodurch ein zweiter Test hier nicht mehr notwendig war. Die SAL/TEMP-Messungen haben hier ebenfalls keine Zu-/Abflusszone gezeigt (vgl. Kapitel 5.3.1).

Aufgrund der anhaltenden Spülungsverluste im oberflächennahen Bereich des Bohrlochs (erste Spülungsverluste sind bei 20,7 m u. GOK aufgetreten) und des Auffüllens des Bohrlochs mit Frischwasser zur Durchführung des Packertests (vorher wurde eine Polymerspülung eingesetzt), wurde eine kürzere Testsequenz abgestimmt, um eine Gefährdung des Bohrlochs so gering wie möglich zu halten. Die Testsequenz umfasst die nachfolgend dargestellten Testphasen:

INF – PSR – PW1 – PW2 – PI – DEF

Tabelle 20 fasst die Ergebnisse der Packertests i1 zusammen. Eine vertiefte Erörterung der Testphasen ist in den Anlagen des Abschlussberichts der hydraulischen Packertests [25] enthalten.

Das Fließmodell und die numerische Auswertung deuten hier auf ein Radial-Composite-Modell mit zeitlich variabler, diskreter Skinzone und c_{t2} und einer Transmissivität von $1,40 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (Bestfit-Wert). Daraus ergibt sich über die Länge des Testintervalls ein als repräsentativ eingeschätzter k_f -Wert von $4,50 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$.

Die aus dem Formationsdruck abgeleitete Süßwasserdruckhöhe liegt bei 149,7 m ü. NN und damit 48,3 m unter der Geländeoberkante von 197,99 m ü. NN.

Packertest i2 (149,00 – 171,18 m) umfasst mit dem Testintervall von 22,18 m in Doppelpackerkonfiguration einen Abschnitt von geschichteten Tonsteinen mit Sandstein-Zwischenlagen sowie oolithischen Sandsteinen („Rogenstein“) des Unteren Buntsandsteins. Oftmals sind schichtparallele Störungen und Klüfte vorhanden, teilweise mit erkennbarem Versatz. Die SAL/TEMP-Messungen haben hier keinen Hinweis auf Zu-/Abflusszonen gezeigt und es sind auch keine nachweisbaren Spülungsverluste aufgetreten. Allerdings schließt das Testintervall Bereiche mit oolithischem Sandstein („Rogenstein“, ca. 158,3 – 164,3 m) ein, welcher auf dem Asse-Höhenzug potentiell als Grundwasserleiter angesprochen werden kann. Die Testsequenz umfasst die nachfolgend dargestellten Testphasen:

INF – PSR – PW – SW – RW – RWS – PI – DEF

Auf Basis der Ergebnisse des Packertests (Tabelle 20) deuten das Fließmodell und die numerische Auswertung auf ein Radial-Composite-Modell mit variabler Skinzone und einer Transmissivität von $5,10 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Bestfit-Wert). Daraus ergibt sich über die Länge des Testintervalls ein als repräsentativ eingeschätzter k_f -Wert von $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$.

Die aus dem Formationsdruck abgeleitete Süßwasserdruckhöhe liegt bei 165,9 m ü. NN und damit 32,1 m tief unter der Geländeoberkante von 197,99 m ü. NN.

Eine vertiefte Erörterung der Testphasen ist in den Anlagen des Abschlussberichts der hydraulischen Packertests [26] enthalten.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 63
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 20: Ergebnisse der Packertests in Intervall i1 und Intervall i2.

			Einheiten			i1			i2		
Intervalltiefe		[m]	54,00	-	85,00	149,00	-	171,18			
		[m ü. NN]	143,99	-	112,99	48,99	-	26,81			
Länge	L	[m]	31,00			22,18					
Modell (Best-Fit)		[-]	Radial-Composite mit zeitlich variabler diskreter Skinzone und c_{tz}			Radial-Composite mit zeitlich variabler Skinzone					
Parameter			Best.	Min.	Max.	Best.	Min.	Max.			
Transmissivität	T	[m ² /s]	1,4E-10	1,1E-10	3,70E-10	5,1E-07	3,5E-08	1,5E-06			
Durchlässigkeit	k_r	[m/s]	4,5E-12	3,6E-12	1,20E-11	2,3E-08	1,6E-09	6,7E-08			
Formationsdruck	P_r	[kPa]	207	198	271	1255	932	1316			
Süßwasserdruckhöhe	h_s	[m]	149,7	148,7	156,1	32,1	25,9	65,1			
		[m ü. NN]	48,3	41,9	49,3	165,9	132,9	172,1			

Packertest i3 (113,00 - 135,18 m) umfasst mit dem 22,18 m langen Testintervall in Doppelpackerkonfiguration überwiegend Tonsteine, in einigen Bereichen mit sulfatverheilten Klüften. Teils ist der Tonstein mit mäßig verfestigten Sandsteineinschaltungen durchzogen. Einzelne kleinere Störungselemente sind grundsätzlich erkennbar, übergeordnete Störungsbrechen oder vergleichbare Ausprägungen konnten nicht identifiziert werden. Unter Berücksichtigung der geophysikalischen Auswertung umfasst der Packertest i3 jedoch grundsätzlich den Übergang von der Süd- auf die Nordflanke. Spülungsverluste konnten nicht verzeichnet werden.

Während die erste Auswertung noch auf einem radialen Modell mit oder ohne diskreten Skin beruhte, wurde für die finale Auswertung ein Radial-Composite-Modell mit zeitlich variabler diskreter Skinzone verwendet, bei dem eine sequenzenweise Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der inneren Zone für die gesamthafte Anpassung der Sequenzen zugelassen wurde. Die erreichten Anpassungen waren von erkennbar besserer Güte.

Die ermittelten Best-Fit-Werte liegen für die Transmissivität von $3,80 \cdot 10^{-9}$ m²/s. Daraus ergibt sich über die Länge des Testintervalls ein als repräsentativ eingeschätzter k_r -Wert von $1,70 \cdot 10^{-10}$ m/s.

Die aus dem Formationsdruck abgeleitete Süßwasserdruckhöhe liegt bei 135,1 m NN und damit 62,9 m tief unter der Geländeoberkante. Die Süßwasserdruckhöhe von 135,1 m NN zeigt das geringste Niveau im Vergleich mit den anderen Testintervallen.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 64

Die Ergebnisse des Packertests i3 sind in Tabelle 21 zusammengefasst. Tiefergehende Erläuterungen können der Anlagen des Abschlussberichts der hydraulischen Packertests [27] entnommen werden.

Packertest i4 (450,70 – 483,00 m) umfasst mit dem Testintervall von 32,30 m in Einfachpacker-konfiguration einen als Residual angesprochenen Bereich zwischen Deckgebirge und Salzformation. Dieser Bereich umfasst im Wesentlichen dunkelrotbraune Tonsteine, welche im Top zunächst meist fest bis hart erscheinen, zur Basis des Residuals hin (bei 479,25 m u. GOK) jedoch zunehmend entfestigt sind. Zwischen 450 - 465 m sind mehrere größere Lithoklasten aus Calciumsulfat eingelagert. Ab 479,25 m Tiefe (R18 (1.)) wurde Steinsalz angetroffen, durchwirkt von Ton und Tonstein.

Aufgrund der anhaltenden Spülungsverluste im Residual (zwischen 460 – 483 m u. GOK) und des Einsatzes mehrerer Verlustpillen zur Bekämpfung der Spülungsverluste, sind die ersten Phasen der nachfolgend dargestellten Testsequenz (PW, SW, RW) durch das Verstopfen des Filterrohrs aufgrund der Verlustpillen beeinträchtigt. Die numerische Auswertung basiert daher ausschließlich auf den Phasen RW2, RWS, PI und SW2:

INF – PW – SW – RW – RW2 – RWS – PI – SW2 – DEF

Das Fließmodell und die numerische Auswertung deuten hier auf ein Radial-Composite-Modell mit nach außen zunehmenden k_f -Werten hin. Aufgrund der in diesem Bereich verpressten Verlustpillen beruht die Auswertung vor allem auf der späteren RW2-RWS-Testssequenz deren Ergebnisse mit deutlich geringeren Unsicherheiten behaftet sind (vgl. Intervalltestbericht [28]). Der Best-Fit-Wert für k_f (entspricht $k_{f\text{-outer}}$) für das getestete Intervall liegt bei $2,50 \cdot 10^{-7}$ m/s mit einer entsprechenden Transmissivität von $8,10 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Die Ergebnisse des Packertests i4 (Tabelle 21) zeigen im Vergleich mit den anderen Testintervallen der R18 die höchsten Durchlässigkeiten bzw. die höchste Transmissivität.

Die aus dem Formationsdruck abgeleitete Süßwasserdruckhöhe liegt bei 164,7 m NN und damit 33,3 m tief unter der Geländeoberkante.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 65
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 21: Ergebnisse der Packertests in Intervall i3 und Intervall i4.

			Einheiten			i3			i4		
Intervalltiefe		[m]	113,00	-	135,18	450,70	-	483,00			
		[m NN]	84,99	-	62,81	-252,71	-	-285,01			
Länge	L	[m]	22,18			32,30					
Modell (Best-Fit)		[-]	Radial-Composite mit zeitlich variabler diskreter Skinzone			Radial-Composite					
Parameter			Best.	Min.	Max.	Best.	Min.	Max.			
Transmissivität	T	[m ² /s]	3,8E-09	1,2E-09	1,3E-08	8,1E-06	6,1E-06	1,2E-05			
Durchlässigkeit	k _r	[m/s]	1,7E-10	5,5E-11	2,8E-10	2,5E-07	1,9E-07	3,7E-07			
Formationsdruck	P _f	[kPa]	600	277	659	4253	4248	4257			
Süßwasserdruckhöhe	h _s	[m]	62,9	56,9	95,8	33,3	32,9	33,8			
		[m NN]	135,1	102,2	141,1	164,7	164,2	165,1			

Packertest i5/i5b (366,00 – 391,09 / 365,90 – 390,99 m) wurde zunächst für das Intervall i5 geplant und gestartet. Aufgrund einer Fehlfunktion der eingebauten Moyno-Pumpe musste der Test unterbrochen werden. Zur Fortsetzung des Tests wurde das Intervall geringfügig nach oben versetzt. Aufgrund der weitgehenden Überlappung der Testbereiche i5 und i5b umfassen diese grundlegend die gleichen lithologischen Einheiten: Der Packertest im Intervall i5/i5b wurde als Doppelpackertest hauptsächlich in festen bis harten Tonsteinen, untergeordnet mit festen bis harten Kalksandsteinen durchgeführt. Das Intervall weist sowohl im Top (bei ~ 369 m u. GOK) und an der Basis (bei ~ 386 m u. GOK) erheblich gestörte Bereiche mit Verfaltungen und Zerschneidungshorizonten aber in der Regel verfüllten Klüften auf.

Aufgrund der Fehlfunktion der Moyno-Pumpe wurde entschieden, den Test im Intervall i5 zu Beginn der RW-Phase abzubrechen. Das Entspannen der Packer erfolgte, nachdem in diesem Intervall noch zwei Injektionspulse (PI und PI2) durchgeführt wurden. Der Pumpertest wurde anschließend im Intervall i5b durchgeführt. Die Auswertung beruht somit auf den kombinierten Daten der beiden Testintervalle und Testsequenzen i5 und i5b:

i5: INF – PSR – COM – PSR2 – SW – SWS – RW – PI – PI2 – DEF

i5b: INF – PSR – RW – RWS – PI – DEF

Das aus den Ergebnissen (Tabelle 22) abgeleitete Fließmodell und die numerische Auswertung deuten in beiden Intervallen i5 und i5b auf ein 2-Zonen-Radial-Composite-Modell hin. Der Best-Fit-Wert für k_r (entspricht k_{f-outer}) für das getestete Intervall i5/i5b liegt bei 1,30 · 10⁻⁸ m/s mit einer entsprechenden Transmissivität von 3,30 · 10⁻⁷ m²/s.

Die aus dem Formationsdruck abgeleitete Süßwasserdruckhöhe liegt bei 156 m NN und damit 42 m tief unter der Geländeoberkante.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 66
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Eine detailliertere Beschreibung der erfolgt in der entsprechenden Anlagen des Abschlussberichts der hydraulischen Packertests [29].

Packertest i6 (739,50 – 760,14 m) umfasst mit einem Testintervall von 20,64 m in Doppelpackerkonfiguration den untersten aufgeschlossenen Bereich des Roten Salztons in der Erkundungsbohrung R18 innerhalb des Salinars. Dieser Bereich wird hauptsächlich durch rotbraunen bis braunen, massigen und in der Regel festen Tonstein gebildet. Die wenig vorhandenen Klüfte sind durch Steinsalz verfüllt.

Aufgrund der geringen zu erwartenden Durchlässigkeit des Roten Salztons im tieferen Bereich des Salinars wurde die nachfolgend dargestellte, verkürzte Testsequenz durchgeführt:

INF – PSR – SW – SWS – PW – DEF

Das Fließmodell und die numerische Auswertung deuten hier auf ein Radial-Composite-Modell. Die ermittelten Best-Fit-Werte liegen für die Transmissivität bei $7,00 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Daraus ergibt sich über die Länge des Testintervalls ein als repräsentativ eingeschätzter k_r -Wert von $3,40 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$.

Die aus dem Formationsdruck abgeleitete Süßwasserdruckhöhe liegt bei 517 m NN was einer theoretischen Höhe von 319 m über Geländeoberkante entsprechen würde.

Neben der zusammenfassenden Darstellung der Ergebnisse in Tabelle 22 lassen sich ausführliche Beschreibungen der entsprechenden Anlage des Abschlussberichts der hydraulischen Packertests [30] entnehmen.

Tabelle 22: Ergebnisse der Packertests in Intervall i5b und Intervall i6.

		Einheiten	i5b			i6		
Intervalltiefe	[m]		365,90	-	390,99	739,50	-	760,14
	[m NN]		-167,91	-	-193,00	-541,51	-	562,15
Länge	L [m]		25,09			20,64		
Modell (Best-Fit)	[-]		Radial-Composite			Radial-Composite mit zeitlich variabler diskreter Skinzone		
Parameter			Best.	Min.	Max.	Best.	Min.	Max.
Transmissivität	T [m ² /s]		3,3E-07	9,6E-08	5,4E-07	7,0E-12	1,5E-12	1,6E-11
Durchlässigkeit	k_r [m/s]		1,3E-08	3,8E-09	2,6E-08	3,4E-13	7,5E-14	7,9E-13
Formationsdruck	P_f [kPa]		3303	3071	3312	10482	10075	10820
Süßwasserdruckhöhe	h_s [m]		42	65	41	- 319	- 278	- 352
	[m NN]		156	133	157	517	476	550

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 67

In den nachfolgenden Abbildung 10 bis Abbildung 12 sind die Ergebnisse der Packertests für die Parameter Durchlässigkeit (k_f), Transmissivität (T) und die Süßwasserdruckspiegelhöhe in den jeweiligen Intervallen abgebildet und gegenübergestellt.

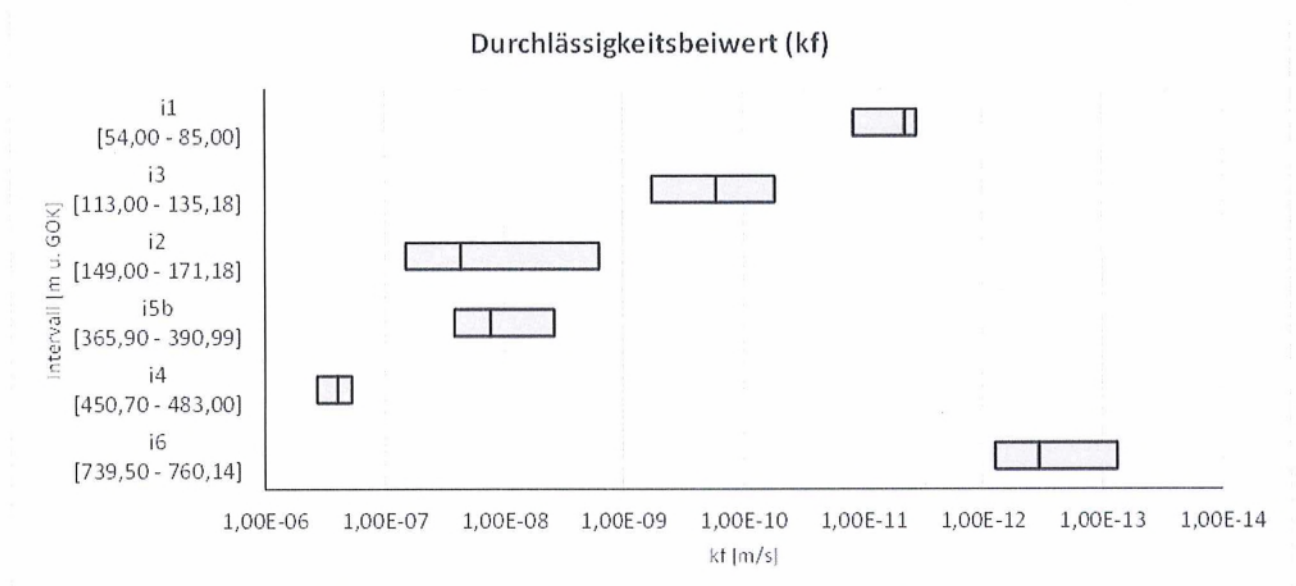


Abbildung 10: Grafische Übersicht der ermittelten hydraulischen Durchlässigkeit in den Testintervallen i1-i6.

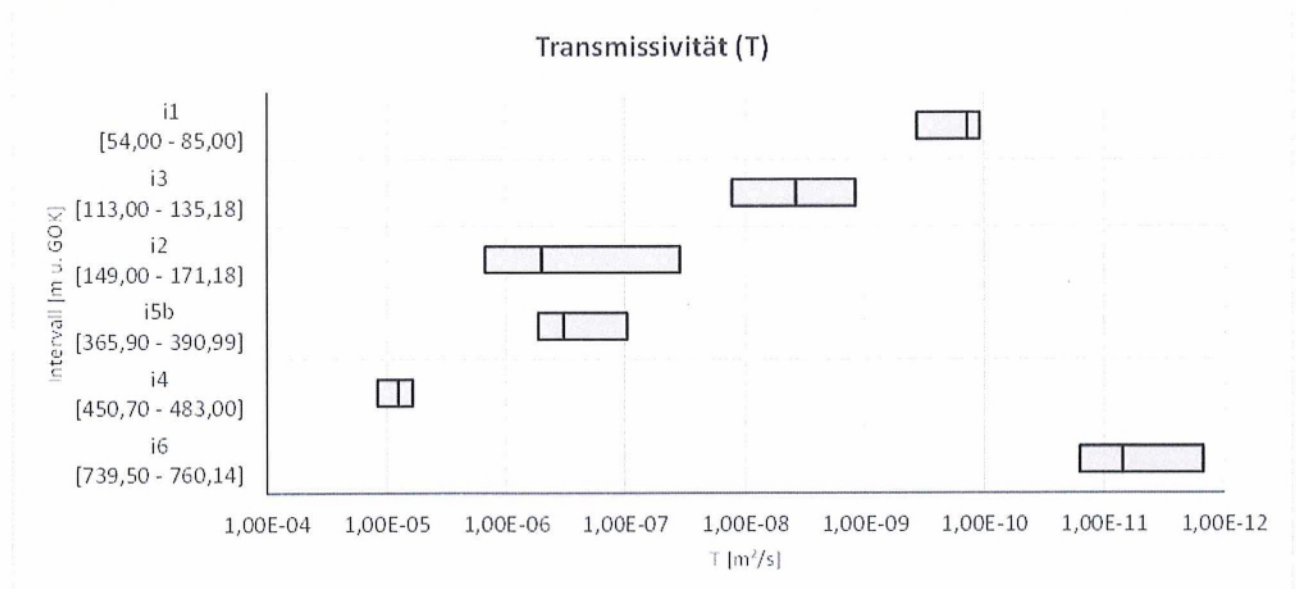


Abbildung 11: Grafische Übersicht der ermittelten Transmissivität in den Testintervallen i1-i6.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 68

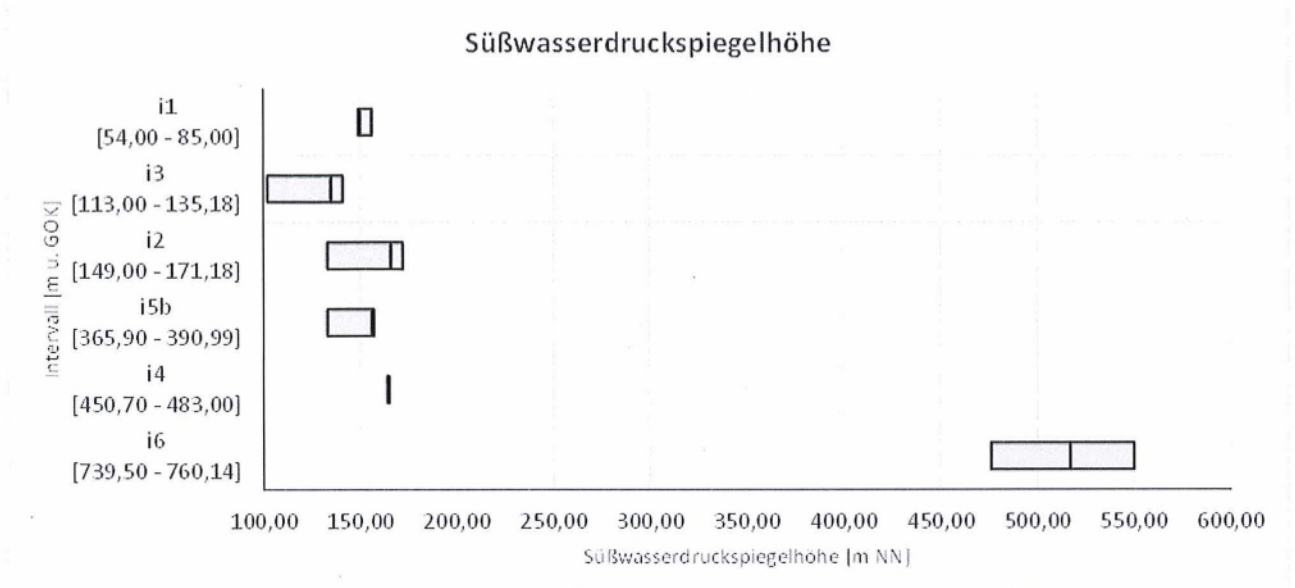


Abbildung 12: Grafische Übersicht der ermittelten Süßwasserdruckspiegelhöhen in den Testintervallen i1-i6.

4.5 Spannungsmessungen

4.5.1 Messprogramm und Messdurchführung

Im Rahmen der Erkundungsarbeiten in der Bohrung R18 wurden Spannungsmessungen und Abdruckpackertests zur Bestimmung von Betrag und Richtung des In-situ-Primärspannungsfeldes in den durchteuften Schichten durchgeführt. Insgesamt erfolgten 12 Messungen in drei verschiedenen Bohrlochabschnitten (vgl. nachfolgende Tabelle 23). Eine ausführliche Beschreibung der durchgeführten Messungen und Auswertemethodik erfolgt im Abschlussbericht der Gebirgsspannungsmessungen [17].

Zur Ermittlung der charakteristischen Druckwerte P_c (Rissinitiierungsdruck), P_r (Rissöffnungsdruck) und P_{si} (Shut-in Druck) der Einzelversuche wurden die digitalen Messdaten einer detaillierten graphischen Auswertung unterzogen. Auf Basis weiterer softwarespezifisch erstellter Cross-Plots kann auf das Verhalten des induzierten Rissystems während der verschiedenen Versuchsphasen geschlossen werden. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Spannungsfeldberechnungen des Auftragnehmers für das Deckgebirge und das Salinar dargestellt. Die zugrundeliegenden Daten, Berechnungen einschließlich der von Auftragnehmer angewendeten Gleichungen und Ergebnisse der Spannungsmessungen sind in separaten Abschlussbericht der Gebirgsspannungsmessungen [17] erläutert.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 69

Tabelle 23: Zusammenstellung der in der Erkundungsbohrung R18 durchgeführten Spannungsmessungen und Abdruckpackertests mit geologischer Zuordnung des Testbereichs [17].

Bezeichn.	Test Nr.	Testtiefe ¹⁾ [m]	Testdatum	Bohrlochab- schnitt	Stratigraphie ²⁾
R18-SpA1	3	94,0	07. – 08.12.2023	BA 2	Oberer Buntsandstein (so)
R18-SpA2	2	148,0			
R18-SpA3	1	185,0			
R18-SpA4	6	253,5	28.01.2024	BA 3	Unterer Buntsandstein (su)
R18-SpA5	4	283,5			
R18-SpA6	5	351,0			
R18-SpA7	10	568,0	29. - 30.04.2024	BA 4	Schwadensalz (z3SS)
R18-SpA8	9	598,5			Roter Salztön (z4RT)
R18-SpA9	8	650,5			Schnee- und Rosensalz (z4SS & z4RS)
R18-SpA10	7	710,5	22.05.2024		Tonmittelsalz (z3TM)
R18-SpA11	12	770,0			Orangensalz und Liniensalz (z3OS & z3LS)
R18-SpA12	11	840,0			

¹⁾ Angabe bezieht sich auf den mittleren Wegaufnehmer der Drucksonde

²⁾ auf Grundlage vorläufiger stratigraphischer Einordnung (vgl. Kapitel 4.2.4)

4.5.2 Ergebnisse im Deckgebirge

Im Deckgebirge wurden in der Erkundungsbohrung R18 sechs Spannungsmessungen und Abdruckpackertests (vgl. Tabelle 23) in Bereichen des Oberen Buntsandstein (1 Test) der Südflanke und des Unteren Buntsandstein (5 Tests) der Nordflanke durchgeführt.

Die charakteristischen Druckwerte der Versuche sowie die Ergebnisse der Bestimmung der räumlichen Orientierung der induzierten bzw. stimulierten Rissflächen sind in Tabelle 24 zusammengestellt. Erläuterungen zur Herangehensweise der Auswertung sind in [17] beschrieben.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 70
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 24: Ergebnisse der hydraulischen Spannungsmessungen in der Bohrung R18 im Bereich des mesozoischen Deckgebirges.

Bezeichn.	Test Nr.	z [m]	P _c [MPa]	P _r [MPa]	T [MPa]	P _{sj} [MPa]	P _{jacking} [MPa]	Riss-spur	θ [deg]	β [deg]	α [deg]	Bemerkung
R18-SpA1	3	94	8,3	4,7	3,6	4,85	4,2 - 4,5	A	103	193	65	
								B	80	170	41	
								C	150	60/240	90	Einzelspur, kurz
R18SpA2	2	148	8,65	6,7	1,95	5,2	5,4	A	130	40	52	
R18SpA 3	1	185,5	16,4	11	5,4	8,3*	(9,7)	A	145	55	54	
								B	172	82/262	90	Einzelspur, undeutlich
								C	32	122/302	90	Einzelspur, undeutlich
R18SpA 4	6	253,5	11,4	6,7	4,7	7,4	7,6	A	23	293	48	
R18SpA 5	4	283,5	14,4	8,35	6,05	8,8	9	A	83	173	66	Teilstücke
								B	116	206	60	Teilstücke
								C	96	186	71	
R18SpA6	5	351	-	6,8	-	7,5-7,6* <7,55>	7,0 - 7,8	A	76 - 111 <93>	166 - 208 <187>	90	Einzelspur

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 71
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Erläuterungen Tabelle 24:

<Wert> Mittelwert,

* 1. RF

P_c : Rissinitiierungsdruck, P_r : Rissöffnungsdruck, T : hydraulische Zugfestigkeit, P_{si} : Shut-in-Druck, $P_{jacking}$: Jacking Druck, θ : Streichen des Risses (Nord über Ost), β : Richtung des Einfallens (Nord über Ost), α : Einfallswinkel (bzgl. Horizontal), A, B und C Kennzeichnen unterschiedliche Risse. Die Tiefenangaben beziehen sich auf die Mitte des 1 m langen Intervalls.

Im Ergebnis der Abdruckpackertests zeigen die meisten Intervalle multiple Rissentwicklungen mit steil einfallenden Risspuren und einem Streichen von E-W und NW-SE. Die Berechnung des Spannungsfeldes erfolgt auf Basis der Spannungsmessungen R18-SpA1, R18-SpA2, R18-SpA4 und R18-SpA6 nach Hubbert und Willis [31] siehe [17], welche eine systematische Zunahme der Shut-in Druckwerte aufweisen. Die Spannungsmessungen R18-SpA3 und R18-SpA5 zeigen erhöhte Shut-in Druckwerte und wurden daher nicht weiter berücksichtigt. In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der Spannungsfeldberechnungen zusammengefasst und in Abbildung 13 grafisch dargestellt.

Bei der Berechnung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H wurde sowohl die Annahme (1) hydrostatischer Porendruckbedingungen bei einem Ruhewasserspiegel von -1,97 m u. GOK ($P_p = P_{hyd} = \rho_{Wasser} \cdot g \cdot [z + 1,97]$) sowie die Annahme der Vernachlässigung des Porendrucks ($P_p = 0$) als Abschätzung der oberen Grenze für S_H zugrunde gelegt. Hinsichtlich der bei der Berechnung verwendeten Dichten wurde unter Berücksichtigung der Spülungszusammensetzung in den jeweiligen Bohrlochabschnitten für die Messungen R18SpA1/2/3 $\rho_{Wasser} = 1,07 \text{ g/cm}^3$ und für die Messungen R18SpA4/5/6 $\rho_{Wasser} = 1,21 \text{ g/cm}^3$ angesetzt. Die Vertikalspannung S_v wurde für eine mittlere Deckgebirgsdichte von $\rho = 2,39 \text{ g/cm}^3$ bis zur Basis des Unteren Bundsandstein in 427,9 m Tiefe bestimmt [17].

Tabelle 25: Ergebnisse der Spannungsfeldberechnungen für die verwendeten Messeinsätze im Deckgebirge der R18.

Bezeichn.	Test Nr.	Tiefe z [m]	P_{hyd} [MPa]	S_v [MPa]	S_h [MPa]	$S_H (P_p = P_{hyd})$ [MPa]	$S_H (P_p = 0)$ [MPa]	θ_{SH} [deg]
R18SpA1	3	94,0	1,0	2,2	4,85	8,8	9,9	103
R18SpA2	2	148,0	1,6	3,5	5,2	7,3	8,9	130
R18SpA4	6	253,5	3,0	5,9	7,4	12,5	15,5	96
R18SpA6	5	351,0	4,2	8,2	7,55	11,65	15,85	93

Erläuterungen zu Tabelle 25:

S_v : Vertikalspannung (berechnet für mittlere Deckgebirgsdichte von $\rho = 2,39 \text{ g/cm}^3$; P_{hyd} : hydrostatischer Druck; θ_{SH} : Streichrichtung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H ; S_H : größere horizontale Hauptspannung; S_h : kleinere horizontale Hauptspannung.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 72

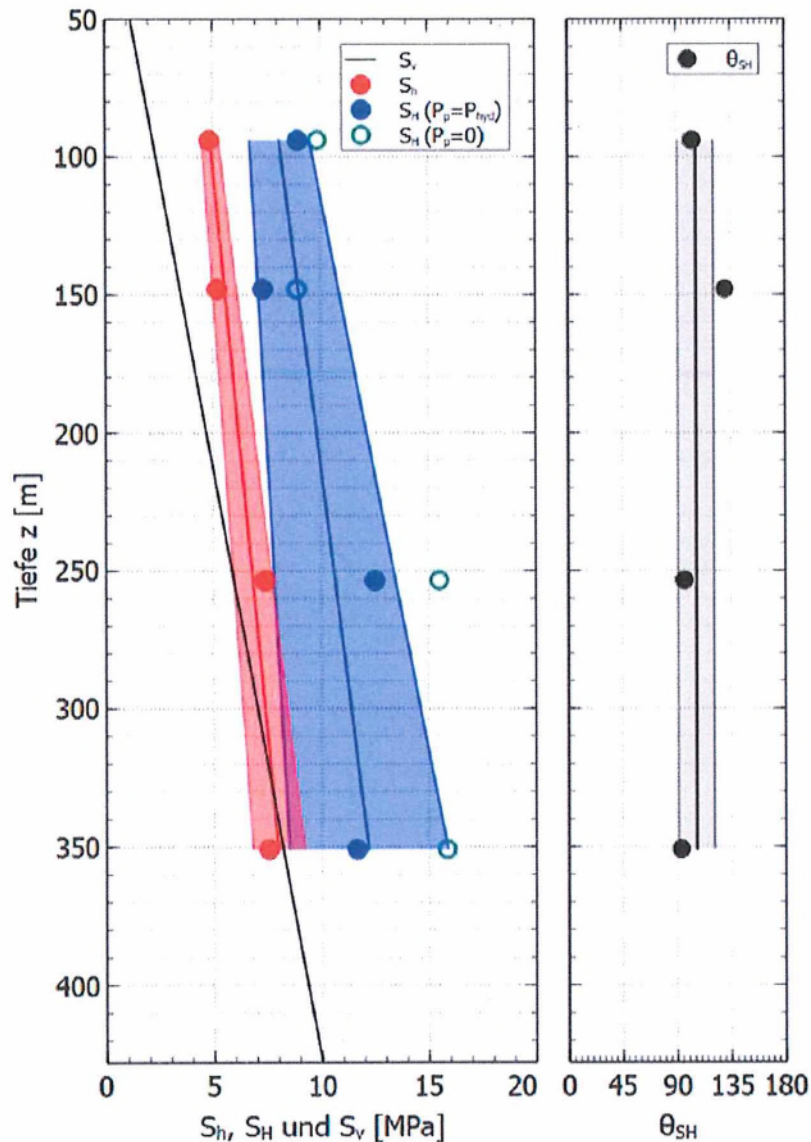


Abbildung 13: Berechnetes Spannungsfeld im Deckgebirgsbereich der Erkundungsbohrung R18, aus [17] (S_v = Vertikalspannung, S_H = größere horizontale Hauptspannung; S_h = kleinere horizontale Hauptspannung; θ_{SH} : Streichrichtung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H).

Die Ergebnisse der Spannungsberechnungen (siehe [17]) mit unterschiedlichen Annahmen des Porendrucks (1) / (2) können durch folgende Spannungs-Tiefen-Relationen im Teufenbereich 94 m – 351 m zusammengefasst werden:

$$S_v \text{ [MPa]} = 0,0234 \cdot z \text{ [m]}$$

$$S_h \text{ [MPa]} = (4,9 \pm 0,4) + (0,012 \pm 0,003) \cdot (z \text{ [m]} - 94)$$

$$1) S_H (P_p = P_{hyd}) \text{ [MPa]} = (8,1 \pm 1,4) + (0,016 \pm 0,009) \cdot (z \text{ [m]} - 94)$$

$$2) S_H (P_p = 0) \text{ [MPa]} = (9,1 \pm 1,5) + (0,029 \pm 0,010) \cdot (z \text{ [m]} - 94)$$

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 73

Basierend auf den Shut-in-Druckwerten weisen die Messwerte im Teufenbereich bis 283,5 m aus, dass die kleinere horizontale Hauptspannung S_h größer als die berechnete Vertikalspannung S_v ist und damit das Spannungsfeld $S_v < S_h < S_H$ vorliegt. Dagegen zeigt der Versuch in 351,0 m Tiefe ein Spannungsfeld mit $S_h \leq S_v < S_H$. Die Richtung der größeren horizontalen Hauptspannung θ_{SH} wurde im mesozoischen Deckgebirge der Bohrung R18 zu $N 106^\circ \pm 15^\circ$ (WNW-ESE) bestimmt [17].

4.5.3 Ergebnisse im Salinar

Im Zechsteinsalinar wurden in der Erkundungsbohrung R18 sechs Spannungsmessungen und Abdruckpackertests (vgl. Tabelle 23) überwiegend in Bereichen mit Steinsalz aber auch im Roten Salzton durchgeführt.

Die charakteristischen Druckwerte der Versuche sowie die Ergebnisse der Bestimmung der räumlichen Orientierung der induzierten bzw. stimulierten Rissflächen sind in Tabelle 26 zusammengestellt. Erläuterungen zur Herangehensweise der Auswertung sind in [17] beschrieben.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 74

Tabelle 26: Ergebnisse der hydraulischen Spannungsmessungen in der Bohrung R18 im Zechsteinsalinar.

Bezeichnung	Test Nr.	Z [m]	P _c [MPa]	P _r [MPa]	T [MPa]	P _{si} [MPa]	P _{jacking} [MPa]	Riss-spur	Θ [deg]	β [deg]	α [deg]	Bemerkung
R18SpA7	10	568	30,2	20,6	9,6	19,3	19,3	A	147	57/237	90	axiale Einzel-spur, deutlich
R18SpA8	9	598,5	38,7 - 34,85	21,3	17,4 - 13,55	16,3	16,5	A	96	6/276	90	axiale Einzel-spur (kurzes Teilstück), un-deutlich
R18SpA9	8	650,5	30,3	21,7	8,6	20,9	20,6	A	90	0/180	90	axiale Doppel-spur, deutlich
R18SpA10	7	710,5	31,7	19	12,7	22,3	22	A	153	63/243	90	axiale Einzel-spur, deutlich
R18SpA11	12	770	30,7	20,4	10,3	24,3	23,5	A	133	43/223	90	axiale Doppel-spur, deutlich
R18SpA12	11	840	-	22,4	-	25,7*	26	A	79	169/349	90	axiale Doppel-spur, nicht dia-metral, deutlich
								B	22	112/292	90	axiale Einzel-spur, deutlich

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 75
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Erläuterungen Tabelle 26:

<Wert> Mittelwert,

* 1. RF

P_c : Rissinitiationsdruck, P_r : Rissöffnungsdruck, T : hydraulische Zugfestigkeit, P_{si} : Shut-in-Druck, $P_{jacking}$: Jacking Druck, θ : Streichen des Risses (Nord über Ost), β : Richtung des Einfallens (Nord über Ost), α : Einfallswinkel (bzgl. Horizontal), A, B und C Kennzeichnen unterschiedliche Risse. Die Tiefenangaben beziehen sich auf die Mitte des 1 m langen Intervalls.

Aus den Werten der Shut-in-Drücke geht hervor, dass diese signifikant größer als der berechnete Überlagerungsdruck S_v für eine mittlere Deckgebirgsdichte von $\rho = 2,37 \text{ g/cm}^3$ bis 490,2 m und eine mittlere Steinsalzdichte von $\rho = 2,25 \text{ g/cm}^3$ ist [17].

Die Ergebnisse der Abdruckpackertests belegen für alle getesteten Teufenbereiche die Erzeugung axialer Risse mit einheitlicher Streichrichtung von E-W bis SE-NW, was auf ein anisotropes in-situ Spannungsfeld hindeutet. Die Berechnung des Spannungsfeldes erfolgt auf Basis der Spannungsmessungen der vorliegenden Messungen im Salinar (R18-SA7 bis R18-SA12), wobei der Test im Roten Salzton (R18-SA8) einen abweichenden Shut-in Druck aufweist. Die Ergebnisse der Spannungsfeldberechnungen sind in Tabelle 27 zusammengefasst und in der Abbildung 14 dargestellt.

Tabelle 27: Ergebnisse der Spannungsfeldberechnung für die Messeinsätze im Zechsteinsalinar der Bohrung R18.

Bezeichn.	Test Nr.	Tiefe z [m]	$S_v = S_{min}$ [MPa]	S_h [MPa]	S_h/S_{min}	θ_{SH} [deg]
R18SpA7	10	568,0	13,1	19,3	1,47	147
R18SpA8	9	598,5	13,8	16,3	1,18	96
R18SpA9	8	650,5	14,9	20,9	1,40	90
R18SpA10	7	710,5	16,3	22,3	1,37	153
R18SpA11	12	770,0	17,6	24,3	1,38	133
R18SpA12	11	840,0	19,1	25,7	1,34	79

Erläuterungen zu Tabelle 27:

S_v : Vertikalspannung (berechnet für eine mittlere Deckgebirgsdichte von $\rho = 2,37 \text{ g/cm}^3$ bis 490,2 m und eine mittlere Steinsalzdichte von $\rho = 2,25 \text{ g/cm}^3$); S_{min} : entspricht minimale Hauptspannung, S_h = kleinere horizontale Hauptspannung; θ_{SH} : Streichrichtung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H .

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 76

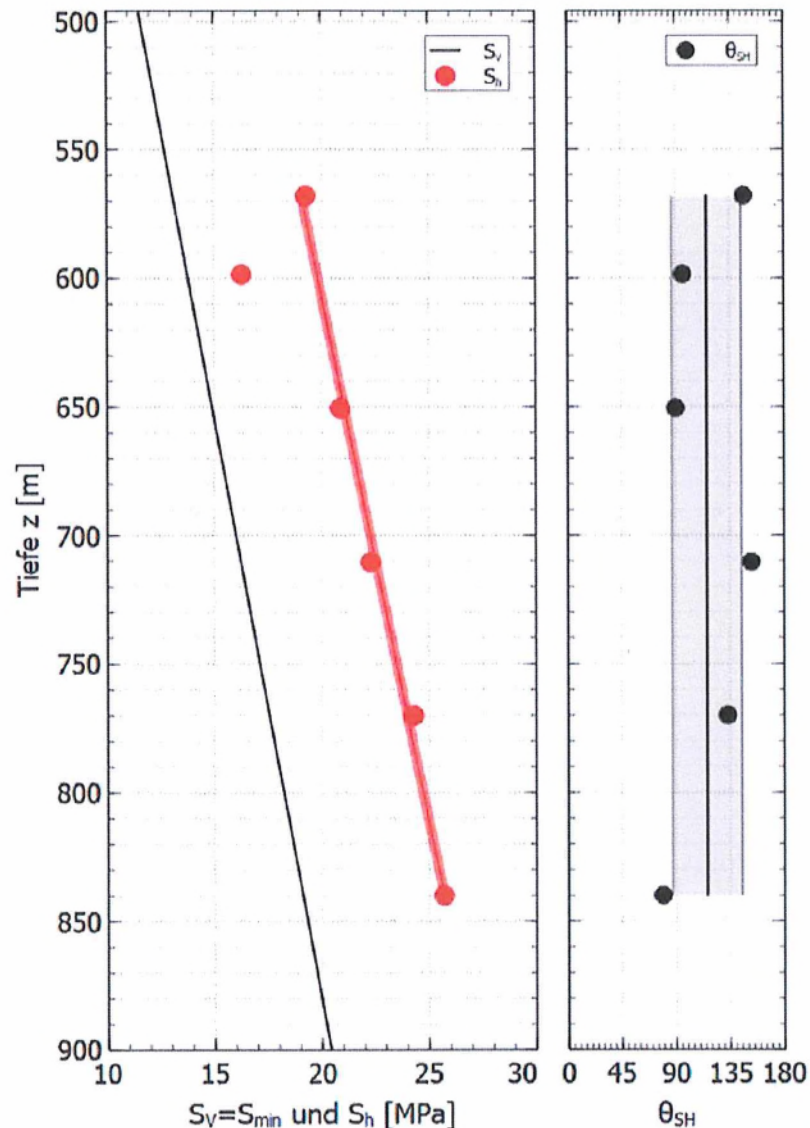


Abbildung 14: Berechnetes Spannungsfeld im Salinar der Erkundungsbohrung R18, aus [17] (S_v = Vertikalspannung, S_{min} = entspricht minimale Hauptspannung; θ_{SH} : Streichrichtung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H).

Aus dem Verhältnis der gemessenen Shut-In-Drücke P_{si} und der jeweils berechneten Überlagerungsdrücke S_v ($S_v < P_{si}$) folgt, dass die Minimalspannung dem Überlagerungsdruck entspricht: $S_{min} = S_v < P_{si}$. Somit ergibt sich im Zechsteinsalinar die minimale Gebirgsspannung S_{min} aus der Vertikalspannung S_v für eine mittlere Deckgebirgsdichte von $\rho = 2,37 \text{ g/cm}^3$ bis 490,2 m und der mittleren Steinsalzdichte von $\rho = 2,25 \text{ g/cm}^3$:

$$S_{min} \text{ [MPa]} = S_v \text{ [MPa]} = 11,5 + 0,0221 \cdot (z \text{ [m]} - 495,8)$$

Die zugrundeliegenden Gleichungen und Ableitungen sind in [17] erläutert.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 77

Die weitgehend einheitliche Orientierung der induzierten bzw. stimulierten Risse weist für das Zechsteinsalinar zwischen 568 m und 840 m Tiefe auf ein anisotropes In-Situ-Spannungsfeld hin. Bei Vernachlässigung des Versuchs im Roten Salzton in 598,5 m liefern die Tests eine kleinere horizontale Hauptspannung S_h , die durch die Spannungs-Tiefen Relation

$$S_h \text{ [MPa]} = (19,1 \pm 0,2) + (0,0243 \pm 0,001) \cdot (z \text{ [m]} - 568)$$

bzw. durch eine mittlere Spannungsrelation

$$S_h/S_{min} \text{ (bzw. } S_h/S_v) = 1,39 \pm 0,04$$

zusammengefasst werden kann.

Basierend auf den Messungen in den Steinsalzbereichen lässt sich die Richtung der größeren horizontalen Hauptspannung θ_{SH} von $N 116^\circ \pm 29^\circ$ ableiten [17].

4.6 Dilatometertests

4.6.1 Messprogramm und Messdurchführung

Im Rahmen der Erkundungsbohrung R18 wurden Dilatometertests mit drei Lastzyklen und vorab definierten Druckstufen zur Bestimmung der Verformungseigenschaften in ausgewählten Gesteinsschichten durchgeführt. Insgesamt wurden 16 Dilatometertests durchgeführt (vgl. nachfolgende Tabelle 28), deren Testbereiche auf Basis bohrtechnischer, lithologischer (vgl. Kapitel 4.2) und geophysikalischer Daten (vgl. Kapitel 4.3) ausgewählt wurden.

Im ersten Bohrlochabschnitt (GOK – 8 5 m) konnten aufgrund der Spülungsverluste im oberflächennahen Bereich und Bedenken hinsichtlich der Bohrlochstabilität keine Dilatometertests durchgeführt werden. Zudem mussten einzelne Dilatometertests abgebrochen oder vom ursprünglich geplanten Messpunkt versetzt werden (siehe Erläuterungen Tabelle 28).

Eine ausführliche Beschreibung der Messausrüstung und -durchführung sowie die Auswertmethode und eine detaillierte Dokumentation der Versuchsergebnisse erfolgt im Abschlussbericht der Gebirgsspannungsmessungen [18]. Im Folgenden werden lediglich die relevanten Ergebnisse zusammengefasst.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 78
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 28: Zusammenstellung der in der Erkundungsbohrung R18 durchgeführten Dilatometer-tests.

Testbereich	Testnummer	Testtiefe ¹⁾ [m]	Testdatum	Bohrlochabschnitt	Stratigraphie ⁵⁾	
R18-D1	#1	91,34	03.12.2023	BA 2	Oberer Buntsandstein (so)	
R18-D2	#2	106,50	03.12.2023			
R18-D3	#3	157,50	02.12.2023		BA 3	Unterer Buntsandstein (su)
R18-D4	#4	185,50	02.12.2023			
R18-D5	#5	283,50	24.01.2024			
R18-D6a ²⁾		350,50	24.01.2024			
R18-D6	#6	351,10	24.01.2024			
R18-D7	#7	381,00	24.01.2024			
R18-D8	#8	439,50	23.01.2024	BA 4	Residualgestein (cr)	
R18-D9 ³⁾		533,50	27.04.2024		Schwadensalz (z3SS)	
R18-D9b ⁴⁾		540,25	28.04.2024			
R18-D9	#9	569,00	28.04.2024			Roter Salzton (z4RT)
R18-D10	#10	598,50	27.04.2024			
R18-D11	#11	650,50	28.04.2024			
R18-D12	#12	710,50	28.04.2024			Schnee- und Rosensalz (z4SS & z4RS)
R18-D13	#13	744,50	17.05.2024			
R18-D14	#14	770,00	17.05.2024			Roter Salzton (z4RT)
R18-D15	#15	840,00	18.05.2025	Tonmittelsalz (z3TM)		
R18-D16	#16	870,00	18.05.2025	Orangensalz und Linien-salz (z3OS & z3LS)		

¹⁾ Angabe bezieht sich auf den mittleren Wegaufnehmer der Dilatometersonde

²⁾ Test abgebrochen da nicht auswertbar

³⁾ Bohrloch zu stark aufgeweitet, Test nicht durchführbar

⁴⁾ Test nach zwei Laststufen abgebrochen, da maximale Aufweitung erreicht

⁵⁾ Auf Grundlage vorläufiger stratigraphischer Einordnung (vgl. Kapitel 4.2.4)

4.6.2 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Dilatometertests zusammengefasst und klassifiziert (vgl. Tabelle 29). In Abbildung 15 sind die Entlastungs- und Erstbelastungsmodul (Elastizitätsmodul resp. Verformungsmodul) als Funktion der Tiefe grafisch dargestellt. Die Berechnungsergebnisse für die einzelnen Lastzyklen unter Verweis auf die verwendeten Wegaufnahmen sind in [18] detailliert zusammengestellt und werden dort ausführlich, u.a. hinsichtlich der Auswertung behandelt.

Die beiden im Oberen Buntsandstein durchgeführten Dilatometertests R18-D1 und R18-D2 zeigen unterschiedliche Ergebnisse bezüglich Verformbarkeit und elastischen Verhalten. Während der Test R18-D1 den größten Wert für das Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul zeigt und einen sehr wenig verformbaren Fels im Hinblick auf das Erstbelastungsmodul ergibt, liegen die Ergebnisse des Tests R18-D2 deutlich tiefer und sind vergleichbar mit den Ergebnissen der nachfolgenden Tests R18-D3 – R18-D7 im Unteren Buntsandstein.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNA AANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 79

Im Unteren Buntsandstein (129 bis ca. 397 m) wurden 5 Dilatometertests durchgeführt (R18-D3 – R18-D7). Die Werte für das Entlastungsmodul liegen zwischen 3,73 GPa und 19,30 GPa und nehmen mit der Tiefe tendenziell ab, womit die Verformbarkeit von moderat zu stark verformbar mit der Tiefe zunimmt. Der Mittelwert beträgt 11,1 GPa bei einer Standardabweichung von 5,8 GPa. Die Werte liegen im geschätzten Bereich von 1 GPa bis 15 GPa gemäß dem Geodatensatz für die R18 [18]. Das Wiederbelastungsmodul zeigt bei den ersten beiden Tests unterschiedliche Werte im Vergleich zum Entlastungsmodul. Bei den restlichen Tests sind Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul ähnlich.

Der Dilatometertest im Residualgestein (R18-D8 auf 439,50 m) zeigt die niedrigsten Werte für jedes der drei Moduli. Das Entlastungsmodul und das Wiederbelastungsmodul haben einen Wert von 1,09 GPa resp. 0,83 GPa. Das Erstbelastungsmodul hat einen Wert von 0,45 GPa und liegt in der Klasse DM5. Es handelt sich um kompakten Felsen, der sich sehr stark deformieren lässt, was bereits an dem plastischen Zustand der Bohrkerne aus dem Bereich erkennbar ist (vgl. 4.2.2 und [2])

Die durchgeführten Dilatometertests im Salinar zeigen in Abhängigkeit von der stratigraphischen Einordnung und lithologischen Ausprägung der Gesteine unterschiedliche Ergebnisse. Eine detaillierte Erörterung ist in [18] enthalten.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 80
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 29: Klassifizierung der Ergebnisse der Dilatometertests in der Erkundungsbohrung R18 gemäß Abschlussbericht Dilatometertests [18].

Klasse	Verformungsmodul ¹⁾ [GPa]	Beschreibung	Test Nr. und Teufe [m]	Stratigraphie ²⁾
DM 1	> 30	Sehr wenig verformbar		
DM 2	10 – 30	Wenig verformbar	R18-D1 (91,34 m)	Oberer Buntsandstein (so)
			R18-D11 (650,50 m)	Schnee- und Rosensalz (z4SS + z4RS)
			R18-D12 (710,50 m)	
			R18-D14 (770,00 m)	Tonmittelsalz (z3TM)
			R18-D15 (840,00 m)	Orangensalz und Liniensalz (z3OS & z3LS)
			R18-D16 (870 m)	
DM 3	3 – 10	Moderat verformbar	R18-D3 (157,50 m)	Unterer Buntsandstein (su)
			R18-D4 (185,50 m)	
			R18-D5 (283,50 m)	
			R18-D9 (569,00 m)	Schwadensalz (z3SS)
			R18-D10 (598,50 m)	Roter Salzton (z4RT)
			R18-D13 (744,50 m)	
DM 4	1 – 3	Stark verformbar	R18-D2 (106,50 m)	Oberer Buntsandstein (so)
			R18-D6 (351,10 m)	Unterer Buntsandstein (su)
			R18-D7 (381,00 m)	
DM 5	< 1	Sehr stark verformbar	R18-D8 (439,50 m)	Residualgestein (R)

¹⁾ Die Klassifizierung basiert auf dem Verformungsmodul $\bar{\epsilon}$

²⁾ Auf Grundlage vorläufiger stratigraphischer Einordnung (vgl. Kapitel 4.2.2)

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 81

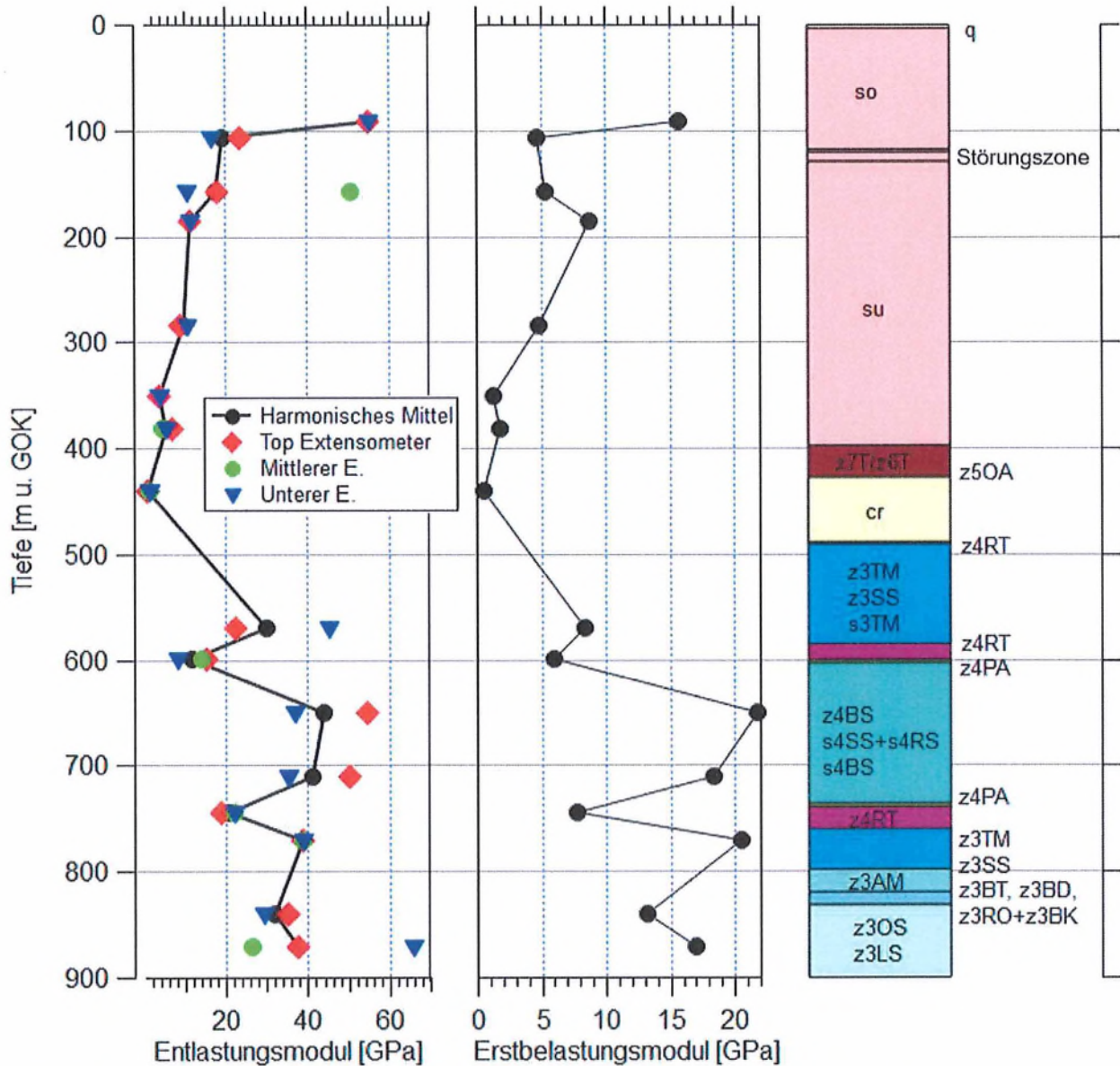


Abbildung 15: Zusammenfassung der gemessenen Entlastungsmodul nach Wegaufnehmer und harmonischem Mittel und Erstbelastungsmodul mit harmonischem Mittel inkl. Stratigraphie der R18 (2.) nach [18].

4.7 Geologische Labor-/Bohrkernuntersuchungen

4.7.1 Geochemische Analysen

Proben aus den Bohrkernen wurden durch die Betriebsgeologie Asse im Rahmen von Borkernmusterungen entnommen (Tabelle 30). Zweck war die Untersuchung des geochemischen Stoffgehaltes, der Mineralogie und teilweise Isotopenanalyse (Sr, S und O). Die Ergebnisse werden in

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 82

einer Datenbank zusammengestellt. Die geochemischen Untersuchungen sind zum Zeitpunkt dieses Berichts noch nicht vollständig abgeschlossen und werden in einem gesonderten Bericht in Ergänzung zu geochemischen Analysen weiterer Bohrungen besprochen.

Tabelle 30: Übersicht der zum Zwecke geochemischer und Isotopenuntersuchungen entnommener Proben von Bohrkernen der R18 (n.v. = nicht vergeben, Min = Mineralogie (XRD), GC = Geochemie (Nasschemische Analyse), Iso = Isotopenanalyse (S-SO₄, O-SO₄, Sr-Sr).

Probenahmehöhe [m]	Analysenbezeichnung	Status	Analyse	Labor
30,30 – 30,41	n.v.	erfolgt	Min	Asse
32,05 – 30,20	n.v.	erfolgt	Min	Asse
78,80 – 79,00	n.v.	erfolgt	Min	Asse
87,00 – 87,20	n.v.	erfolgt	Min	Asse
96,00 – 96,12	A01800010	erfolgt	Min, GC, Iso	Eurofins
96,00 – 96,12	A01800004	erfolgt	Min, GC	Asse
117,50 – 118,00	A01800015	erfolgt	Min, GC, Iso	Eurofins
117,50 – 118,00	A01800023	erfolgt	Min, GC	Asse
128,53 – 128,72	A01800020	erfolgt	Min, GC, Iso	Eurofins
128,53 – 128,72	A01800024	erfolgt	Min, GC	Asse
158,74 – 158,90	A01800011	erfolgt	Min, GC, Iso	Eurofins
158,74 – 158,90	A01800005	erfolgt	Min, GC	Asse
164,30 – 164,40	A01800006	erfolgt	Min, GC	Asse
422,04 – 422,15	A01800021	erfolgt	Min, GC, Iso	Eurofins
422,04 – 422,15	A01800025	erfolgt	Min, GC	Asse
431,57 – 431,67	A01800012	erfolgt	Min, GC, Iso	Eurofins
431,57 – 431,67	A01800007	erfolgt	Min, GC	Asse
451,59 – 451,70	A01800013	erfolgt	Min, GC, Iso	Eurofins
451,59 – 451,70	A01800008	erfolgt	Min, GC	Asse
475,70 – 475,85	A01800014	erfolgt	Min, GC, Iso	Eurofins

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 83

Probenahmehöhe [m]	Analysenbezeichnung	Status	Analyse	Labor
475,70 – 475,85	A01800009	erfolgt	Min, GC	Asse
479,18 – 479,44	A01800017	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
483,35 – 483,50	A01800036	ausstehend	Min, GC, Iso	Eurofins
483,35 – 483,50	A01800042	erfolgt	Min, GC	Asse
486,00 – 486,10	A01800016	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
547,45 – 547,63	A01800026	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
567,44 – 567,53	A01800027	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
584,26 – 584,40	n.v.	ausstehend	Min, GC, Iso	K-UTEC
584,26 – 584,40	A01800048	erfolgt	Min, GC	Asse
586,53 – 586,68	A01800038	ausstehend	Min, GC, Iso	Eurofins
586,53 – 586,68	A01800044	erfolgt	Min, GC	Asse
600,00 – 600,24	A01800039	ausstehend	Min, GC, Iso	Eurofins
600,00 – 600,24	A01800045	erfolgt	Min, GC	Asse
635,43 – 635,60	A01800028	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
663,00 – 663,20	A01800029	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
692,11 – 692,41	A01800018	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
705,87 – 706,05	A01800019	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
732,20 – 732,39	n.v.	ausstehend	Geochemie	K-UTEC
737,05 – 737,15	A01800041	ausstehend	Min, GC, Iso	Eurofins
737,05 – 737,15	A01800047	erfolgt	Min, GC	Asse
759,46 – 759,64	A01800043		Min, GC	Asse
759,46 – 759,64	A01800037	ausstehend	Min, GC, Iso	Eurofins
759,46 – 759,64	A01800043	erfolgt	Min, GC	Asse

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 84
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Probenahmetiefe [m]	Analysenbezeichnung	Status	Analyse	Labor
763,20 – 763,29	n.v.	ausstehend	Min, GC, Iso	K-UTEC
774,25 – 774,48	n.v.	ausstehend	Min, GC, Iso	K-UTEC
780,96 – 781,26	A01800040	ausstehend	Min, GC, Iso	Eurofins
780,96 – 781,26	A01800046	erfolgt	Min, GC	Asse
790,96 – 791,13	A01800020	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
819,39 – 819,60	n.v.	ausstehend	Min, GC, Iso	K-UTEC
819,39 – 819,60	A01800049	erfolgt	Min, GC	Asse
823,50 – 823,70	n.v.	ausstehend	Min, GC, Iso	K-UTEC
823,50 – 823,70	A01800050	erfolgt	Min, GC	Asse
826,52 – 826,68	n.v.	ausstehend	Min, GC, Iso	K-UTEC
826,52 – 826,68	A01800051	erfolgt	Min, GC	Asse
827,79 – 827,99	n.v.	ausstehend	Min, GC, Iso	K-UTEC
827,79 – 827,99	A01800052	erfolgt	Min, GC	Asse
829,01 – 829,10	A01800030	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC
873,78 – 873,99	A01800031	erfolgt	Min, GC, Iso	K-UTEC

Neben den BGE-eigenen bzw. durch BGE an externe Labore vergebenen geochemischen Untersuchungen wurde von IfG im Rahmen der gesteinsmechanischen Untersuchungen ebenfalls die mineralogische Zusammensetzung der für die gesteinsmechanischen Untersuchungen vorgesehenen Prüfkörper analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in [32] zusammengefasst.

4.7.2 Hydrochemische Analysen

Das Ziel der hydro- und isotochenchemischen Analysen besteht in der Gewinnung von Informationen zu den hydrochemischen Eigenschaften des Grundwassers im Umfeld der Erkundungsbohrung R18. Hieraus lassen sich im Zusammenspiel mit geologischen und weiteren hydrogeologischen Informationen ggf. übergeordnete Erkenntnisse zum hydrogeologischen Systemverständnis ableiten.

Im Rahmen der durchgeführten hydraulischen Packertests (vgl. Kapitel 4.4) wurden in drei verschiedenen Testbereichen im Deckgebirge Formationswasserproben durch die Solexperts AG zur

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 85

Analytik entnommen. Die Probenahme erfolgte zum Ende der Förderphase (RW-Phase) der jeweiligen hydraulischen Packertests. Im Vorfeld der Probenahmen wurden Einzelproben zur Bestimmung des Uraningehalts entnommen. Der Abgleich erfolgt hier mit der Bohrspülung, welche während des Durchteufens des Deckgebirges (Bohrlochabschnitt 2 und 3) mit 1 ppm ($\approx 1 \text{ mg/L}$) Uranin versetzt wurde. Eine ausführliche Beschreibung der hydraulischen Packertests und der Durchführung der Probenahme ist in den Anlagen [25], [26], [27], [28], [29], [30] des Abschlussberichts [16] enthalten.

Die gewonnenen Proben wurden anschließend fachgerecht behandelt, versendet und von der Firma K-UTEC AG SALT TECHNOLOGIES (grundlegende Parameter) sowie der Firma Hydroisotop GmbH (spezielle Parameter, Isotopenanalysen) analysiert. Die Analyseergebnisse sind im Anhang 1 enthalten.

4.7.2.1 Probenahme

Die Darstellung und Auswertung der Rahmenbedingungen der Probenahme während der Packertests dienen in erster Linie der Abschätzung der Kontamination mit Bohrspülung, die wiederum für die Interpretation der hydro- und isotopenchemischen Ergebnisse in den folgenden Kapiteln von Bedeutung ist. Dies ist besonders wichtig, da vor der Beprobung teilweise größere Mengen an Spülungsverlusten aufgetreten sind. Weiterhin sind die im Verlauf der Probenahme erhobenen physikalisch-chemischen Parameter von Bedeutung. Die Bestimmung der Vor-Ort-Parameter erfolgte in einer Durchflussmesszelle auf dem Bohrplatz.

Eine Übersicht der Testbereiche, sowie der entnommenen Proben ist in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Übersicht der gewonnenen Proben zur hydrochemischen Analyse in der Erkundungsbohrung R18. Die durchgeführten Vollanalysen sind in blauer Farbe hinterlegt.

Testintervall	Testbereich [m u. MBP]	Probe	Probenahmedatum	Analysedatum	Bemerkung
-	-	Spülprobe S0	21.11.2023 10:15	23. – 30.11.2023	Probe zur Bestimmung des Uraningehalts
		Spülprobe S1	22.11.2023 18:00	10. – 11.12.2023	
		Spülprobe S2	24.11.2023 12:00		
		Spülprobe S3	05.12.2023 07:50		
i2	149,00 – 171,18	R18_i2_RW#1	05.12.2023 16:07		Wasserprobe
		R18_i2_RW#2	05.12.2023 17:05		
		R18_i2_RW#3	05.12.2023 18:05		
		R18_i2_RW#4	05.12.2023 19:05		
		R18_i2_RW#5	05.12.2023 20:05		
		R18_i2_RW#6	05.12.2023 20:30		
i5b	365,90 – 390,99	Spülprobe BA3-S0	22.01.2024 15:15	19.02. – 06.03.2024	Probe zur Bestimmung des Uraningehalts
		R18_i5b_RW#1	26.01.2024 22:01		

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 86
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Testintervall	Testbereich [m u. MBP]	Probe	Probenahmedatum	Analyse datum	Bemerkung
		R18_i5b_RW#2	27.01.2024 04:02		
		R18_i5b_RW#3	27.01.2024 08:15		
		R18_i5b_RW#4	27.01.2024 09:30		
i4	450,70 – 483,00	R18_i4_RW#1	07.02.2024 03:50		Probe zur Bestimmung des Uraningehalts
		R18_i4_RW#2	07.02.2024 10:54		
		R18_i4_RW#3	07.02.2024 19:15		
		R18_i4_RW#4	08.02.2024 01:00		
		R18_i4_RW#5	08.02.2024 06:00		Wasserprobe

Nachfolgend ist die Entwicklung der physikochemischen Parameter der drei verschiedenen Grundwasserproben R18 i2 RW#6, R18 i4 RW#5 und R18 i5b RW#4 vor und während der Probenahmen erläutert. Die Probenahme der Spülproben S0 – S3 erfolgte im Vorfeld der Packertests zur Referenzmessung der Uraninkonzentration in der Bohrspülung.

Probenintervall i2:

Während des Packertests im Intervall i2 wurden zunächst fünf Proben (R18 i2 RW#1 – R18 i2 RW#5) entnommen und vor Ort die physikochemischen Parameter, sowie im Labor der Uraningehalt bestimmt. Anschließend erfolgte die Probenahme der Probe R18 i2 RW#6, bei welcher ebenfalls die Vor-Ort-Parameter bestimmt wurden. Im Labor wurde diese Probe umfangreich analysiert. Ebenso wurde eine Spülprobe vor dem Packertest im Intervall i2 entnommen (R18 Spülprobe S3).

Aufgrund der Vor-Ort-Parameter und dem Ablauf des Packertests ist die Probe „R18 i2 RW#1“ als Standwasserprobe aus dem Druckgestänge der Packergarnitur zu werten. Der niedrige Sauerstoffgehalt während des gesamten Packertests deutet hier bereits auf einen geringen Anteil der Bohrspülung an dem geförderten Grundwasser hin. Insbesondere die in der nachfolgenden Abbildung 16 dargestellte Entwicklung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit und des Uraningehalts verweisen auf eine weitere Abnahme des Anteils an Bohrspülung bis zur analysierten Grundwasserprobe R18 i2 RW#6. Die Bohrspülung war in diesem Bohrlochabschnitt (und damit auch in dem getesteten Intervall) noch nicht aufgesalzen. Die Dichte lag in den Tagen vor dem Packertests und der Probenahme bei 1,07 g/cm³ (Tagesberichte #46 – 48). Die weiteren physikochemischen Parameter zeigen keine einheitliche Entwicklung (vgl. Tabelle 32).

Eine erste Einschätzung der Kontamination des beprobten Grundwassers mit Bohrspülung anhand einer einfachen Mischungsrechnung zeigt, dass bis zur eigentlichen Probenahme der Probe R18 i2 RW#6 nur noch wenig Bohrspülung (< 5 %) vorhanden ist. Hierbei ist bereits berücksichtigt, dass die Bohrspülung vor dem eigentlichen Packertest (R18 Spülprobe S3) nur eine geringe Uraninkonzentration von 0,244 mg/L aufweist.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 87

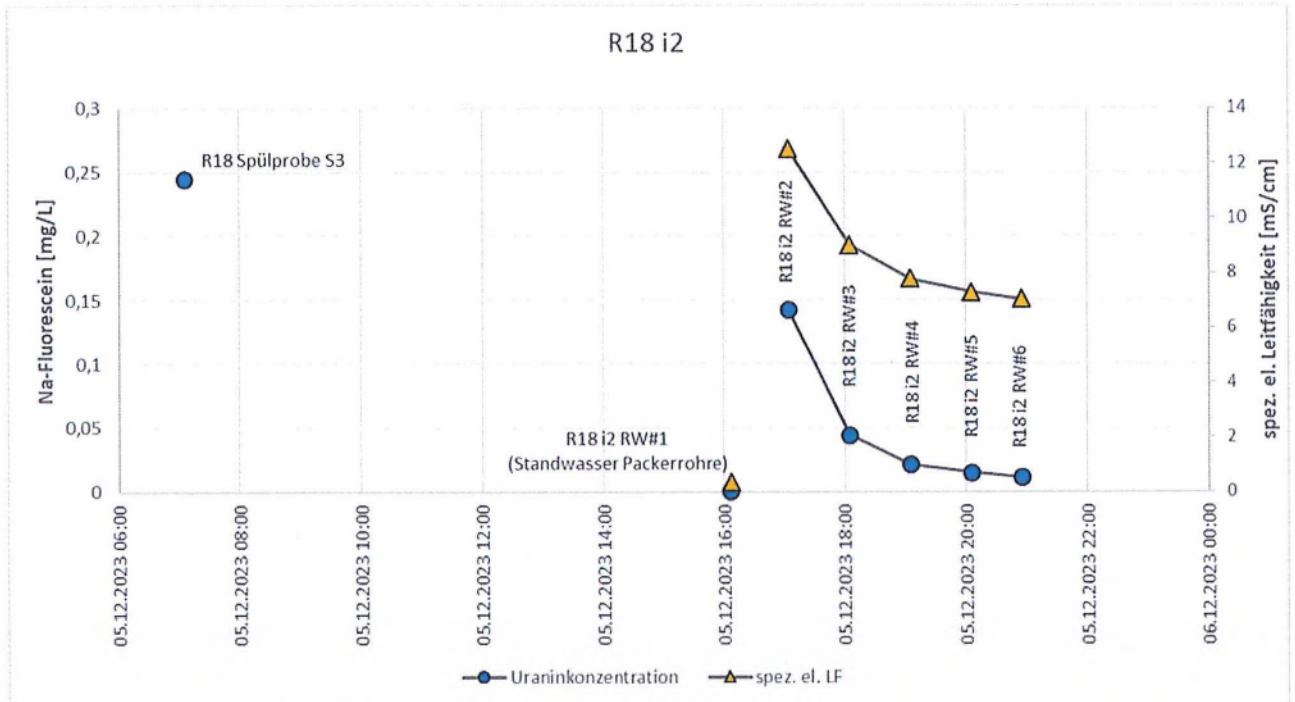


Abbildung 16: Analyseergebnisse der Uraninkonzentration (Na-Fluorescein) und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (Vor-Ort-Parameter) im Intervall i2 der Erkundungsbohrung R18.

Tabelle 32: Vor Ort erfasste physikochemische Parameter sowie die im Labor analysierte Uraninkonzentration im Intervall i2.

Probe	Datum	pH [-]	Uranin [mg/L]	Temperatur [°C]	LF [mS/cm]	O ₂ [mg/L]
R18 Spülprobe S3	05.12.2023 07:05	-	0,244	-	-	-
R18 i2 RW#1	05.12.2023 16:07	7,72	0,00016	9,0	0,344	0,32
R18 i2 RW#2	05.12.2023 17:05	8,34	0,142	12,2	12,5	0,0
R18 i2 RW#3	05.12.2023 18:05	8,32	0,044	10,2	9,0	0,0
R18 i2 RW#4	05.12.2023 19:05	8,37	0,021	10,57	7,771	0,0
R18 i2 RW#5	05.12.2023 20:05	8,40	0,015	10,75	7,296	0,0
R18 i2 RW#6	05.12.2023 20:55	8,40	0,011	10,9	7,030	0,0

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 88

Probenintervall i5b:

Während des Packertests im Intervall i5b wurden zunächst drei Proben (R18 i5b RW#1 – R18 i5b RW#3) entnommen und vor Ort die physikochemischen Parameter, sowie im Labor der Uraningehalt bestimmt. Anschließend erfolgte die Probenahme der Probe R18 i5b RW#4, bei welcher ebenfalls die Vor-Ort-Parameter bestimmt wurden. Im Labor wurde diese Probe umfangreich analysiert. Ebenso wurde eine Spülprobe vor dem Packertest im Intervall i5b entnommen (R18 Spülprobe BA3-S0).

Insbesondere die in der nachfolgenden Abbildung 17 dargestellte Entwicklung der Sauerstoffkonzentration zeigt eine deutliche Abnahme des Anteils an Bohrspülung bis zur analysierten Grundwasserprobe. Die Analyse der Uraninkonzentration der Proben R18 i5b RW#1 – R18 i5b RW#4 bestätigt dies. Die weiteren physikochemischen Parameter zeigen keine einheitliche Entwicklung (vgl. Tabelle 33).

Die Bohrspülung weist in den Tagen vor dem Packertest und der durchgeführten Probenahme konstant eine Dichte von 1,21 g/cm³ auf (Tagesberichte #88 - #92). Am Tag des Packertests und der Probenahme nimmt die Dichte auf 1,16 g/cm³ ab. Diese Abnahme ist durch die Mischung der Bohrspülung mit dem geförderten Grundwasser zu erklären. Die analysierte Wasserprobe R18 i5b RW#4 hat im Vergleich zur Bohrspülung eine Dichte von 1,027 g/cm³.

Eine Einschätzung der Kontamination des beprobten Grundwassers mit Bohrspülung anhand einer einfachen Mischungsrechnung zeigt, dass bis zur eigentlichen Probenahme nur noch wenig Bohrspülung (< 3 %) vorhanden ist.

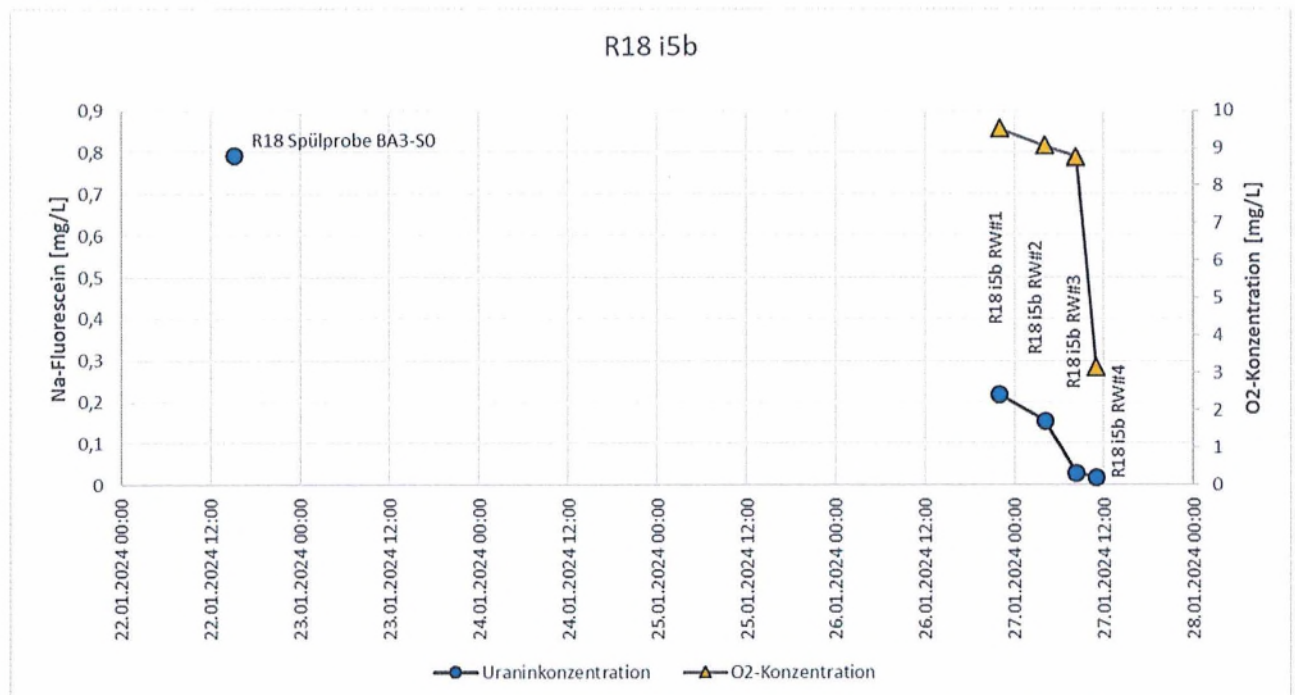


Abbildung 17: Analyseergebnisse der Uraninkonzentration (Na-Fluorescein) und der O₂-Konzentration (Vor-Ort-Parameter) im Intervall i5b der Erkundungsbohrung R18.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 89

Tabelle 33: Vor Ort erfasste physikochemische Parameter sowie die im Labor analysierte Uraninkonzentration im Intervall i5b.

Probe	Datum	pH [-]	Uranin [mg/L]	Temperatur [°C]	LF [mS/cm]	O ₂ [mg/L]
R18 Spülprobe BA3-S0	22.01.2024 15:15	-	0,793	-	-	-
R18 i5b RW#1	26.01.2024 22:00	7,81	0,217	13,77	-	9,52
R18 i5b RW#2	27.01.2024 04:00	7,79	0,156	16,70	-	9,07
R18 i5b RW#3	27.01.2024 08:15	7,79	0,0292	17,01	65	8,76
R18 i5b RW#4	27.1.2024 11:00	8,84	0,0177	13,08	53,6	3,14

Probenintervall i4:

Während des Packertests im Intervall i4 wurden zunächst vier Proben (R18 i4 RW#1 – R18 i4 RW#4) entnommen und vor Ort die physikochemischen Parameter, sowie im Labor der Uraningehalt bestimmt. Anschließend erfolgte die Probenahme der Probe R18 i4 RW#5, bei welcher ebenfalls die Vor-Ort-Parameter bestimmt wurden. Im Labor wurde diese Probe umfangreich analysiert. Eine Spülprobe vor dem Packertest im Intervall i4 wurde nicht entnommen.

Die Uraninkonzentration bewegt sich mit ca. 0,08 – 0,14 mg/L annähernd konstant auf einem geringen Wert und zeigt im Verlauf des Packertests keine eindeutig absteigende Tendenz (Abbildung 18), wie in den Intervallen i2 und i5b zu sehen ist. Abgesehen von der Sauerstoffkonzentration weisen auch die anderen physikochemischen Parameter (vgl. Tabelle 34) im Intervall i4 keine eindeutigen Trends auf, welche Rückschlüsse auf den Anteil der Bohrspülung am geförderten Grundwasser ermöglichen könnten. Lediglich der Sauerstoffgehalt zeigt eine kontinuierliche Abnahme bis zum Zeitpunkt der Probenahme der Probe R18 i4 RW#5 auf. Im Verlauf des Packertests sinkt diese Konzentration bis auf einen Wert von < 0,1 mg/L ab.

Die Bohrspülung weißt in den Tagen vor dem Packertest und der durchgeführten Probenahme leicht schwankende Dichtewerte von 1,16 – 1,19 g/cm³ auf (Tagesberichte #100 - #104). Die analysierte Wasserprobe hat eine Dichte von 1,178 g/cm³. Die Werte der Bohrspülung und der analysierten Probe liegen in einem vergleichbaren Bereich, da die Bohrspülung im Bereich des Salzspiegels vollständig aufgesalzen wurde.

Eine erste Einschätzung der Kontamination des beprobten Grundwassers durch Bohrspülung anhand einer einfachen Mischungsrechnung zeigt, dass bis zur Probenahme der Probe R18 i4 RW#5 noch etwa 8 % Bohrspülung vorhanden sind. Da keine Spülprobe im Intervall i4 im Vorfeld des Packertests genommen wurde, erfolgt die Mischungsrechnung hier unter Berücksichtigung der vorgesehenen Uraninkonzentration von 1 mg/l in der Bohrspülung.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 90

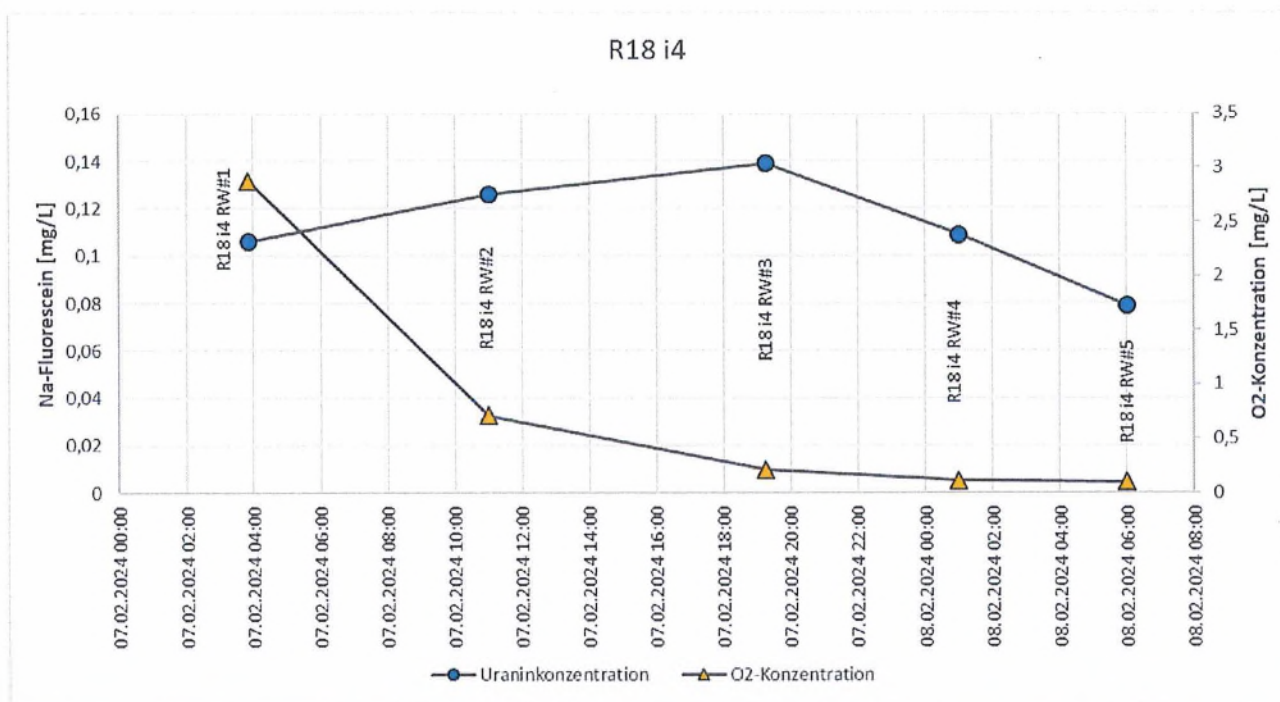


Abbildung 18: Analyseergebnisse der Uraninkonzentration (Na-Fluorescein) und der O₂-Konzentration (Vor-Ort-Parameter) im Intervall i4 der Erkundungsbohrung R18.

Tabelle 34: Vor Ort erfasste physikochemische Parameter sowie die im Labor analysierte Uraninkonzentration im Intervall i4.

Probe	Datum	pH [-]	Uranin [mg/L]	Temperatur [°C]	LF [mS/cm]	O ₂ [mg/L]
R18 i4 RW#1	07.02.2024 03:50	8,12	0,106	13,0	-	2,88
R18 i4 RW#2	07.02.2024 11:00	7,7	0,126	13,3	-	0,71
R18 i4 RW#3	07.02.2024 19:15	7,5	0,139	17,8	-	0,21
R18 i4 RW#4	08.02.2024 01:00	7,5	0,109	19,1	-	0,11
R18 i4 RW#5	08.02.2024 06:00	7,5	0,0789	18,9	236	0,09

4.7.2.2 Haupt-, Begleit- und Spurenelemente

Die hydrochemische Beschaffenheit der während der Packertests gewonnenen Wasserproben ermöglichen es, die Kontamination mit Bohrspülung gegenüber den Abschätzungen in Kapitel 4.7.2.1 fundierter zu quantifizieren und geben – mittels aussagekräftiger Leitparameter – Hinweise zu den chemischen Milieubedingungen innerhalb des Grundwasserleiters.

Die hydrochemischen Analyseergebnisse der drei Wasserproben aus den Intervallen i2, i5b und i4 sind in der nachfolgenden Tabelle 35 zusammengefasst. Die vollständigen Analyseprotokolle sind im Anhang 1 enthalten.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 91

Tabelle 35: Ergebnisse der hydrochemischen Analysen. Grau hinterlegte Parameter wurden auf Basis der vorliegenden Analyse errechnet.

	Einheit	R18 i2	R18 i4	R18 i5b	Bemerkung
Datum		05.12.2023	08.02.2024	27.01.2024	
Temp_Field	°C	10,9	18,9	13,8	
pH_Field		8,4	7,5	8,84	
O2_Field	mg/L	0	0,09	3,14	
Eh_Field	mV	-344	-179	-1,89	reduzierende Bedingungen
Temp_Lab	°C	22	24	24	
pH_Lab		7,31	7,2	7,33	
Eh_Lab	mV	546	420	381	oxidierende Bedingungen
O2_Lab	mg/L	3,1	9,05	3,85	
LF_Lab	mS/cm	7,03	236,0	53,6	
Dichte_Lab	g/cm ³	1,007	1,178	1,027	
CSB	mg/L	449	380	818	
DOC	mg/L	185	508	214	vermutlich aus der Bohrspülung
TDC	mg/L	275	598	287	
Na-Fluorescein	mg/L	0,011	0,0789	0,0177	Hinweis: Bohrspülung konstant mit 1 mg/L versetzt
Hauptinhaltsstoffe					
Na	mg/L	1120	101000	12000	
K	mg/L	22,3	2070	35,6	
Ca	mg/L	651	1100	373	
Mg	mg/L	91	2760	114	
Cl	mg/L	630	164000	20400	
HCO3	mg/L	420	422	346	
SO4	mg/L	2780	7270	758	R18-i2 & R18-i4 ~ gesättigt, R18-i5b untersättigt.
CO2	mg/L	26,4	23,6	17,5	
CO3	mg/L	0,91	1,98	1,22	
Begleitstoffe					
Fe(II)	mg/L	< 0,6	< 0,6	1,19	
Fe(III)	mg/L	2,4	12,6	1,26	
Mn	mg/L	< 0,5	0,77	< 0,5	
Nitrat	mg/L	4,69	146	< 0,2	
Nitrit	mg/L	< 0,22	105	< 0,22	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 92
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

	Einheit	R18 i2	R18 i4	R18 i5b	Bemerkung
Ammonium	mg/L	< 0,6	4,96	< 0,6	
Phosphat	mg/L	< 3	< 3	< 3	
Kaliumhexa- cyanoferrat(II)	mg/L	0,01	0,44	0,13	
Spurenstoffe					
Aluminium	mg/L	< 1	1,18	< 1	
Arsen	mg/L	0,0134	< 0,01	< 0,01	
Barium	mg/L	< 0,2	< 0,2	< 0,2	
Bor	mg/L	3,64	7,55	0,68	
Bromid	mg/L	< 1	116	2,5	
Cadmium	mg/L	< 0,2	< 0,2	< 0,2	
Cäsium	mg/L	< 2	< 2	< 2	
Chrom	mg/L	0,11	< 0,1	< 0,1	
Cobalt	mg/L	< 0,2	< 0,2	< 0,2	
Kupfer	mg/L	< 1	< 1	< 1	
Fluorid	mg/L	0,43	0,44	0,22	
Iodid	mg/L	< 0,5	< 5	< 5	
Lithium	mg/L	< 2	< 2	< 2	
Nickel	mg/L	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Phosphor	mg/L	< 1	< 1	< 1	
Blei	mg/L	< 0,2	< 0,2	< 0,2	
Rubidium	mg/L	< 1	1,4	< 1	
Silizium	mg/L	9,53	< 5	< 5	
Strontium	mg/L	9,84	14,4	6,82	
Thorium	mg/L	0,0044	0,026	0,0094	
Titan	mg/L	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Tritium	TU	0,3 +/- 0,4	2,5 +/- 0,4	0,4 +/- 0,4	
Uran	mg/L	0,004	0,014	0,0039	
Zink	mg/L	< 0,2	0,25	< 0,2	
Berechnete Parameter					
Σ Kationen	meq/L	90,55	4730,8	552,10	
Σ Anionen	meq/L	82,81	4790,57	597,10	
Ionenbilanz- fehler	%	4,46	-0,63	-3,92	< 5 %: im Wei- testen belastbar
Typus		Ca-Na-SO ₄	Na-Cl	Na-Cl	
Isotopen					
¹⁸ O (δ ¹⁸ O)	‰	-9,5	-9,12	-10,23	
² H (δ ² H)	‰	-63,6	-60,4	-64,4	δ ¹⁸ O (‰ V- SMOW)

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 93
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

	Einheit	R18 i2	R18 i4	R18 i5b	Bemerkung
C-13 ($\delta^{13}C$ -DIC)	‰ VPDB	-6,2	-6,2	-10,5	
C-14 ($\delta^{14}C$ -DIC)	‰-mod	20,8 +/- 0,2	15,1 +/- 0,1	11,2 +/- 0,1	
Deuterium - Exzess	‰	12,4	12,56		
O-18 ($\delta^{18}O$ -SO ₄)	‰	13,1	11,2		
S-34 ($\delta^{34}S$ -SO ₄)	‰	16,1	10,5		
³ He (in ccSTP/g)	ccSTP/g	1,25E-13			
³ He/ ⁴ He		5,43E-08			
⁴ He (in ccSTP/g)	ccSTP/g	0,0000023			
Neon (ccSTP/g)	ccSTP/g	0,00000024			
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr		0,70898 +/- 0,00003	0,708164 +/- 0,00003		

* Diese Parameter wurden nachträglich auf Basis der vorliegenden Analysen errechnet.

Die gewonnenen Wasserproben enthalten einen hohen Anteil an Sediment bzw. Schwebstoffen. Diese hohen Sedimentgehalte können im Kontext der Probenahme i. W. durch eine Kontamination der Wasserproben durch Bohrspülung, durch die Mobilisierung von Sedimenten, bzw. Spülungsresten (Filterkuchen an der Bohrlochwand, in besonderem Maße jedoch beim Einsatz von „Verlustpillen“), sowie bei der Förderung oder durch die Ausfällung von Mineralphasen bei der Druckentlastung erklärt werden. Dies trifft insbesondere für die Probe aus dem Intervall i4 zu. Dort wurden vor dem Packertest und der Probenahme aufgrund der hohen Spülungsverluste mehrere „Verlustpillen“ verpumpt. Hohe Sedimentgehalte müssen bei der Bewertung (v. a. der Isotope und der Radionuklide) berücksichtigt werden.

Die chemische Analyse der Grundwasserprobe R18 i4 RW#5 lässt eine Kontamination durch anthropogen beeinflusste Wässer bzw. Stoffe vermuten. Insbesondere die hohen DOC- Nitrat-, Nitrit-, Fe(III)- und Ammonium-Konzentrationen dieser Probe legen diesen Schluss nahe. Die ermittelten Werte sind sowohl für die getestete Formation, als auch für oberflächennahe Grundwässer der Asse unplausibel. Die in der Bohrspülung und den Verlustpillen eingesetzten Stoffe scheinen hierfür ebenfalls nicht ursächlich zu sein. Ob bereits eine Kontamination des zur Anmischung der Bohrspülung und der Verlustpillen verwendeten Wassers vorlag, lässt sich im Nachhinein nicht mehr nachvollziehen. Die hohen DOC-Gehalte der anderen Grundwasserproben lassen sich durch den Einfluss der verlorenen Bohrspülung erklären. Abgesehen dieser Auffälligkeiten, weisen die hydrochemischen Analysen insgesamt einen geringen Ionenbilanzfehler auf (Differenz < 5 %) und sind entsprechend als weitestgehend belastbar einzustufen.

Die gewonnenen Grundwasserproben aus den drei unterschiedlichen Testintervallen zeigen anhand der physikalisch-chemischen Parameter und der Massenkonzentration der Haupt-, Begleit- und Spurenelemente eine in Abhängigkeit des Testintervalls unterschiedliche Beschaffenheit auf. Die Probe aus dem Intervall i2 (R18 i2 RW#6 – Deckgebirge, Unterer Buntsandstein) ist vom Na-Ca-SO₄-Typus. Die beiden anderen Proben aus den Intervallen i5b (R18 i5b RW#4) und i4 (R18 i4 RW#5) weisen hingegen einen aufgrund der geringen Entfernung zum Salztrop zu erwartenden Na-

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 95

- ca. 4,5 % Zumischung Bohrspülung in der Probe R18 i2
(hierbei wird der geringe Anfangswert des Uraningehalts aus der Spülprobe S3 zugrunde gelegt)
- ca. 7,9 % Zumischung Bohrspülung in der Probe R18 i4
(hierbei wird die vorgegebene Uranin-Konzentration in der Bohrspülung von 1 mg/l zugrunde gelegt)
- ca. 2,2 % Zumischung Bohrspülung in der Probe R18 i5b
(hierbei wird der geringe Anfangswert des Uraningehalts aus der Spülprobe BA3-S0 zugrunde gelegt)

4.7.2.3 Isotope

Die gewonnenen Formationswasserproben wurden hinsichtlich verschiedener hydrochemischer Isotopenverhältnisse und -konzentrationen analysiert. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Tabelle 35 dargestellt. Eine Auswertung der hydrochemischen Isotopenanalysen erfolgt meist eng im Abgleich mit den Analysen aus anderen Messstellen, um hier Entwicklungen und Verhältnisse aufzeigen zu können. Aus diesen lassen sich gegebenenfalls Erkenntnisse zur Herkunft, des Alter oder anderer hydrochemischer Prozesse ableiten. Nachfolgend sind die Ergebnisse diskutiert.

Aufgrund unvorhergesehener Schwierigkeiten bei der Probenahme der Probe R18 i4 RW#5 konnte hier keine Teilprobe zur Analyse von Helium, Neon erfolgen.

4.7.2.3.1 Wasserisotope

Die beiden stabilen Isotope Deuterium (^2H) und Sauerstoff-18 (^{18}O), die von Natur aus in Wassermolekülen vorkommen können, verhalten sich chemisch konservativ, werden also nicht aufgrund chemischer Reaktionen mit anderen Stoffen aus den bestehenden Verbindungen gelöst und gelten somit als ideale Tracer. Physikalische Prozesse hingegen, die einen Phasenübergang bewirken (z. B. Verdunstung und Kondensation), führen zu einer Fraktionierung dieser beiden Isotope, wodurch wiederum eine charakteristische Markierung von Niederschlags-, Grund- und Oberflächenwässern bewirkt wird [33].

Für die gewonnenen Formationswasserproben in der Erkundungsbohrung R18 wurden die in Tabelle 35 aufgeführten $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte analysiert. Eine grafische Darstellung der Wasserisotope in Relation zur Global Meteoric Water Line (GMWL) bzw. zur Local Meteoric Waterline (LMWL, Basis: GNIP-Daten der Station Braunschweig, nach [34]) zeigt Abbildung 20.

Die Deuterium- und Sauerstoffisotopen der drei Wasserproben aus der R18 liegen sehr nahe an der GMWL ($\delta^2\text{H} = 8,0 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \text{ ‰}$), aber nicht auf der LMWL der nahegelegenen GNIP-Station Braunschweig ($\delta^2\text{H} = 7,92 \pm 0,10 \cdot \delta^{18}\text{O} + 4,1 \pm 0,75 \text{ ‰}$ mittels RMA aus GNIP-Daten 1978–2019 berechnet). Dies entspricht auch den typischen Befunden vieler beprobter Grundwässer des Asse-Höhenzuges (vgl. [34]), die nahe der GMWL liegen aber von der LMWL abweichen. Diese Diskrepanz ist vermutlich auf Höheneffekte und/oder lokale klimatische Einflüsse des Asse-Höhenzuges zurückzuführen. Die Gründe für die Abweichung der drei Wasserproben der R18 von der GMWL in Richtung positiver $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, d.h. eine geringfügig relative Deuteriumanreicherung sind jedoch nicht klar. Ähnliche Abweichungen haben sich auch in der Erkundungsbohrung Remlingen 10 gezeigt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 96

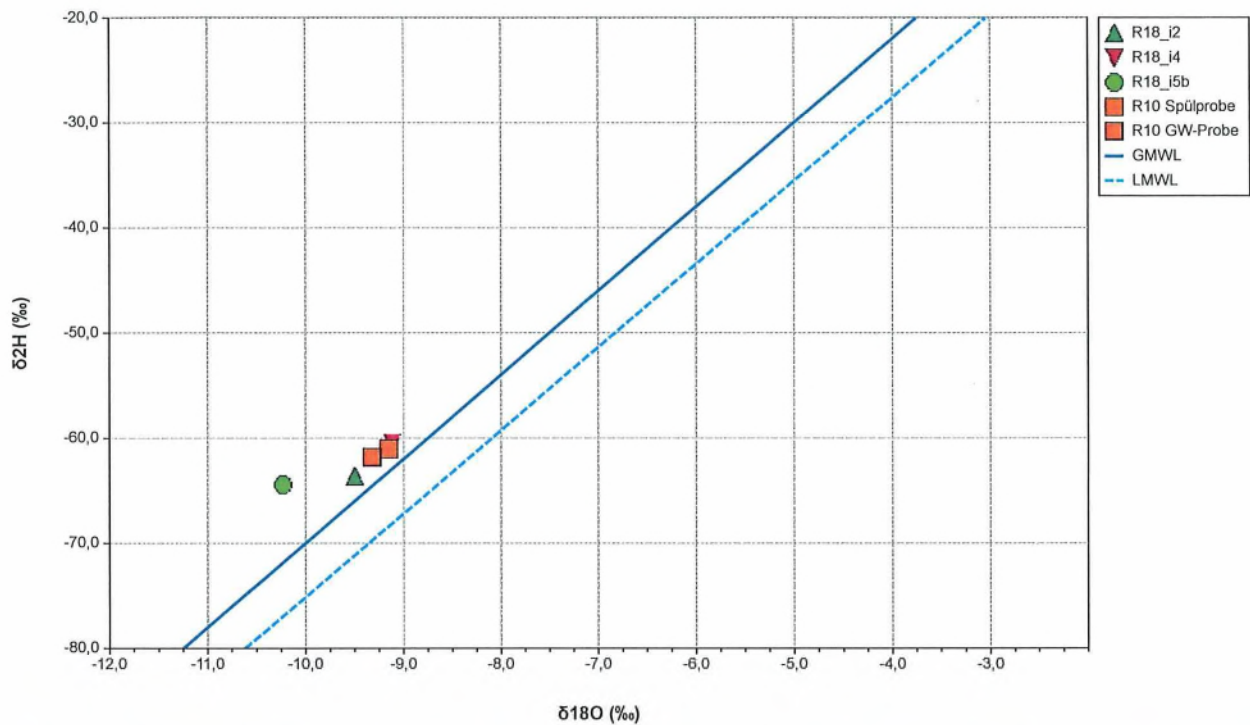


Abbildung 20: δ²H-δ¹⁸O-Diagramm der Wasserproben aus der R18 und der R10. Dargestellt sind zudem die GMWL und die LMWL (Station Braunschweig).

4.7.2.3.2 Tritium und Helium

Aufgrund der kurzen Halbwertszeit des Tritiums (³H) von ca. 12,32 Jahren und durch die mittels Kernwaffenversuche in den 1950er- und 1960er-Jahre hervorgerufenen hohen ³H-Gehalte im Niederschlag, die um bis zu drei Größenordnungen über den natürlichen Gehalten lagen, wird ³H vielfach verwendet, um die Verweilzeit moderner Grundwässer, d. h. jünger als 50 Jahre, zu bestimmen. Die ³H-Gehalte werden dabei als absolute Konzentrationen gemessen und in Tritium Units (TU; 1 TU = ein ³H-Atom pro 10¹⁸ H-Atome) angegeben. Anhand der o. g. Halbwertszeit kann dann das Infiltrationsalter der Wasserprobe berechnet werden.

Das aus dem Zerfall des ³H entstandene ³He_{tri} reichert sich im Grundwasser an und ist gegenüber chemischen Einflüssen weitestgehend inert. Der ³He_{tri}-Gehalt (Einheit: TU) wird aus der Messung der ⁴He-Konzentration und des ³He/⁴He-Verhältnisses abgeleitet. Die mit dieser Methode berechneten ³H-³He_{tri}-Alter sind unabhängig von der Ausgangskonzentration des ³H.

Die Analysenergebnisse der Tritium-Heliumanalytik der Wasserproben aus den drei Intervallen der R18 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 97
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 36: Wasserstoff- und Heliumisotope.

	R18 i2	R18 i4	R18 i5b
Tritium [TU]	0,3 +/- 0,4	2,5 +/- 0,4	0,4 +/- 0,4
⁴ He [ccSTP/g]	2,3E-06	-	6,94E-07 +/- 5,8E-09
³ He/ ⁴ He-Verhältnis	5,43E-08	-	1,04E-07 +/- 7,22 E-09
³ He [ccSTP/g]	1,25E-13	-	7,21E-14 +/- 5,55E-15
Ne/He-Verhältnis	0,1043	-	0,2291

Eine weitere Anwendung der ³H-³He_{tri}-Datierung ist die qualitative Abschätzung der Verweilzeiten von „alten“ Grundwässern auf Basis des bei dieser Methode bestimmten radiogenen ⁴He_{rad}, welches durch α-Zerfall von U- und Th-Nukliden in der Matrix des GW-Leiters entsteht [35]. Unter Annahme einer konstanten ⁴He_{rad}-Akkumulationsrate steigt die ⁴He_{rad}-Konzentration im Wasser mit der Zeit linear an, und kann somit Verweilzeiten von Grundwässern im Bereich zwischen 10³ bis 10⁸ Jahren anzeigen sofern der ⁴He-Fluss aus dem Erdmantel vernachlässigbar gering ist [34].

Eine grafische Darstellung der ermittelten ³H- und ⁴He_{rad}-Konzentrationen der Grundwasserproben aus der R18, in der zum Vergleich auch Ergebnisse weiterer Grund- und Quellwässer des Asse-Höhenzuges dargestellt sind, ist in Abbildung 21 gezeigt.

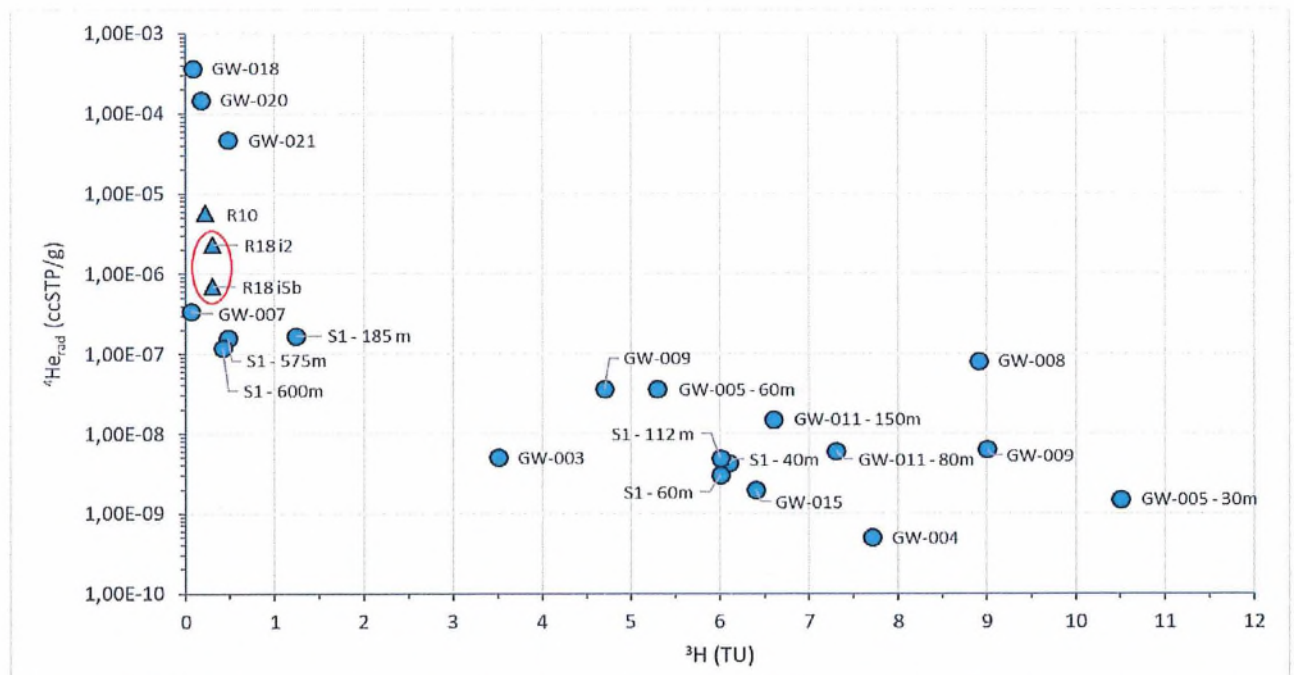


Abbildung 21: Darstellung der ³H- gegen die ⁴He_{rad}-Konzentration in den Wasserproben der Erkundungsbohrung R18 (roter Kreis) im Vergleich zu den Wasserproben des Asse-Höhenzuges [34]. Die Punkte stellen die Wasserproben aus Grundwassermessstellen, die Dreiecke Wasserproben aus Erkundungsbohrungen dar.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 98

Die beiden untersuchten Wasserproben R18 i2 RW# 6 und R18 i5b RW#4 weisen geringe Tritiumgehalte bei relativ hohen $^4\text{He}_{\text{rad}}$ -Konzentrationen auf (vgl. Abbildung 18). Diese Werte deuten auf ein höheres Alter (Infiltration mindestens vor 1952) der untersuchten Wässer hin. Eine Zumischung rezenten Grundwassers kann zudem anhand der ^3H - und $^4\text{He}_{\text{rad}}$ -Konzentrationen ausgeschlossen werden. Auch bestätigen die geringen Tritiumgehalte der beiden Proben die in Kapitel 0 anhand der abnehmenden Uraningehalte (sowie abnehmender Werte der spez. elektrischen Leitfähigkeit bzw. des O_2 -Gehalts) vermutete geringe Kontamination der Proben durch Bohrspülung.

Das $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis der Proben liegt mit $5,43\text{E}-08$ (R18 i2 RW#6) grob im Bereich der typischen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse der Erdkruste ($R_{\text{clt}} \text{ ca. } 2,0\text{E}-08$) bzw. mit $1,04\text{E}-07$ (R18 i5b RW#4) zwischen dem Bereich von $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnissen der Erdkruste und $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnissen von Wasser das mit der Luft in Berührung steht, dessen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis entsprechend im Gleichgewicht mit dieser steht ($R_{\text{ASW}} = 1,384 \cdot 10^{-6}$), vgl. Abbildung 22. Die tiefen R/ R_{ASW} -Verhältnisse von 0,039 (R18 i2 RW#6) bzw. 0,075 (R18 i5b RW#4) verweisen auf lange Verweilzeiten des Wassers innerhalb des Gebirges und einer entsprechenden Akkumulation von radiogenem ^4He in den beiden Proben. Ein signifikanter Anteil von Mantel-Helium lässt sich hier ausschließen.

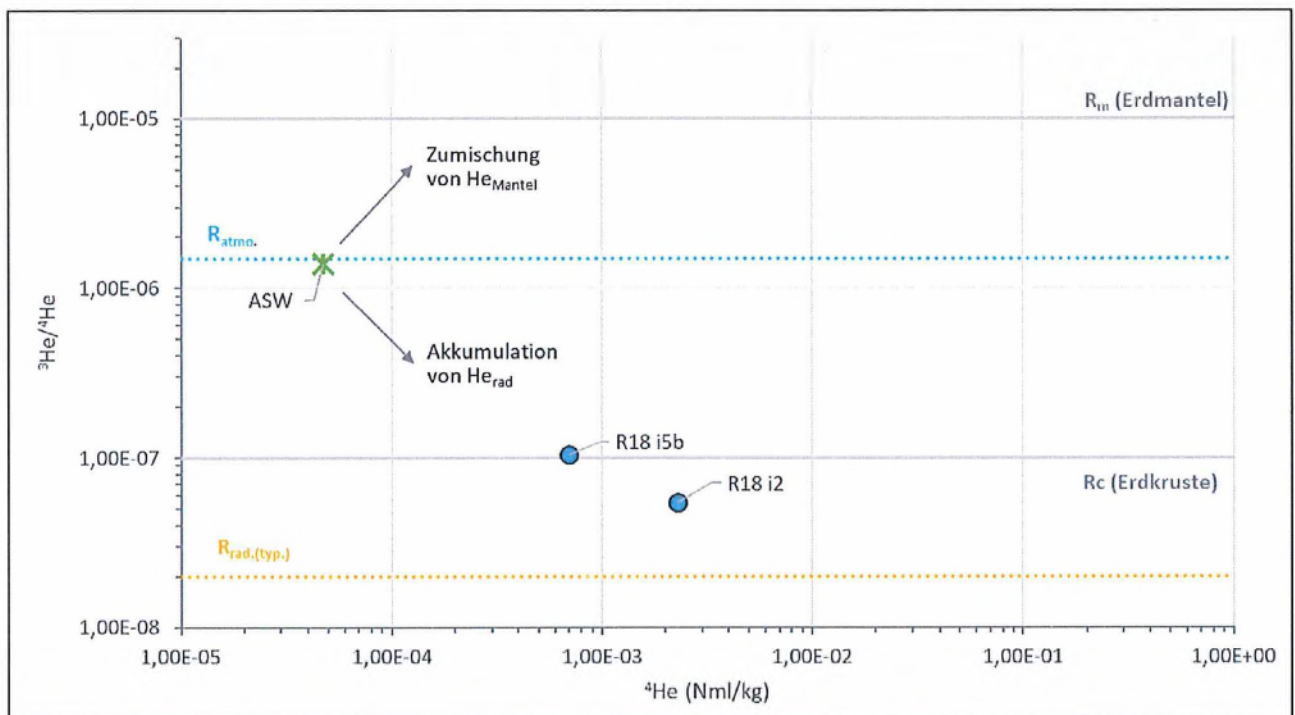


Abbildung 22: Darstellung des $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisses gegen den $^4\text{He}_{\text{rad}}$ -Gehalt für die analysierten Wasserproben der R18 im Vergleich mit dem Grundwasser im Gleichgewicht mit der Atmosphäre (ASW), sowie $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wertebereiche für Erdkruste und Erdmantel.

4.7.2.3.3 Kohlenstoffisotope

Der Hauptanwendungsbereich der ^{14}C -Isotope im gelösten anorganischen und organischen Kohlenstoff („DIC“ und „DOC“) des Grundwassers ist die Bestimmung von Verweilzeiten bis hin zu 60.000 Jahren. Das instabile ^{14}C bildet sich in der Atmosphäre aus Stickstoff und gelangt über das atmosphärische CO_2 der Bodenzone als DIC und DOC in das Grundwasser. Zur Datierung wird die Konzentration von ^{14}C im Grundwasser gemessen und als „percent Modern Carbon“ („pMC“,

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 99
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

%-mod) eines internationalen Standards angegeben. Anhand der Halbwertszeit des ^{14}C von 5568 Jahren lässt sich dann ein auf das Jahr 1950 bezogene Radiocarbon-Alter der Wasserprobe angeben.

Die Messwerte der Kohlenstoffisotope in den drei Wasserproben aus der R18 sind in der nachfolgenden Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Analyseergebnisse der Kohlenstoffisotope C-13 und C-14.

Probe	Einheit	R18 i2	R18 i4	R18 i5b
C-13 ($\delta^{13}\text{C-DIC}$)	‰ VPDB	-6,2	-6,2	-10,5
C-14 ($\delta^{14}\text{C-DIC}$)	%-mod	$20,8 \pm 0,2$	$15,1 \pm 0,1$	$11,2 \pm 0,1$

Bedingt durch die Analyse der Sedimentfracht in der Probe und die Kontamination mit Bohrspülung bestehen Unsicherheiten bzw. Schwierigkeiten bei der Bestimmung des C-14-Modellalters. Der Einfluss des Sedimentanteils hierauf ist zusammen mit der Massenbilanzierung schwer einzuschätzen. Mit Vorlage dieses Berichtes stehen noch weitere Auswertungen zur Bestimmung des C-14-Modellalters aus.

4.7.2.3.4 Schwefelisotope

Die Schwefel- und Sauerstoffisotope an Sulfaten aus sedimentären Schichtenfolgen weisen aufgrund von kurz- und langfristigen Schwankungen der Isotopenwerte im Verlauf der Erdgeschichte oftmals eine alterstypische Isotopensignatur auf. Diese Signatur überträgt sich bei der Lösung der Sulfate nahezu 1:1 auf die Grundwässer, sofern keine weiteren sulfat- oder schwefelhaltigen Schichtenfolgen durchströmt werden oder reduzierende Bedingungen auftreten. Daher lassen die Schwefel- und Sauerstoffisotope des im Grundwasser gelösten Sulfats oftmals Aussagen über Provenienz und Fließwege zu, insbesondere dann, wenn die stratigraphischen Einstufungen der möglicherweise durchströmten Gesteine bekannt sind. Die jeweiligen Isotopenverhältnisse werden üblicherweise mit Bezug auf den V-SMOW (^{18}O) und V-CDT (^{34}S) Standard angegeben.

Die Messwerte der Schwefel- bzw. Sauerstoffisotope am Sulfat der drei Wasserproben aus der R18 sind wie folgt (vgl. Tabelle 35):

- R18 i2: $\delta^{18}\text{O-SO}_4$ von 13,1 ‰ V-SMOW und $\delta^{34}\text{S-SO}_4$ von 16,1 ‰ V-CDT
- R18 i4: $\delta^{18}\text{O-SO}_4$ von 11,2 ‰ V-SMOW und $\delta^{34}\text{S-SO}_4$ von 10,5 ‰ V-CDT
- R18 i5b: $\delta^{18}\text{O-SO}_4$ von 15,0 ‰ V-SMOW und $\delta^{34}\text{S-SO}_4$ von 12,8 ‰ V-CDT

Die beiden Wasserproben R18-i2 und R18-i4 sind an Sulfat gesättigt (vgl. Kapitel 0), während die Wasserprobe R18-i5b an Sulfat untersättigt ist. Es wird grundsätzlich angenommen, dass das Sulfat in den Wasserproben primär aus der Lösung von Gips bzw. Anhydrit und ggf. Sulfiden in den durchströmten Schichtenfolgen stammt, ggf. sind auch Mischungen verschiedener Wässer denkbar (angesichts der hohen Sulfatkonzentrationen werden mögliche atmosphärische Einträge hier vernachlässigt).

Aufgrund der geologischen Situation im Umfeld der Erkundungsbohrung R18 und der Teufenposition der Probenahmen ist für die Wasserproben R18-i2 und R18-i5b (Probenahme erfolgte im Unteren Buntsandstein) zunächst eine entsprechende Isotopensignatur zu erwarten. Die Ergebnisse (Abbildung 23) zeigen jedoch, dass eine einfache Zuordnung nicht möglich ist. Einer weiteren Auswertung vorgehend ist davon auszugehen, dass die Isotopensignatur die Schichtenfolge eines po-

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 100

tentiellen Fließpfades widerspiegelt. Hier handelt es sich im Wesentlichen um potentiell über Störungssysteme angebundene Schichtenfolgen des Mittleren und Oberen Buntsandsteins, ggf. aber auch um Schichtenfolgen des Muschelkalks.

Aufgrund der Position des Intervalls R18-i4 im Residual ist eine stratigraphische Zuordnung aufgrund der Sulfatisotopensignaturen schwierig. Vermutlich weist die Grundwasserprobe eine Mischsignatur aus Unterem Buntsandstein und Zechstein auf (vgl. Abbildung 23).

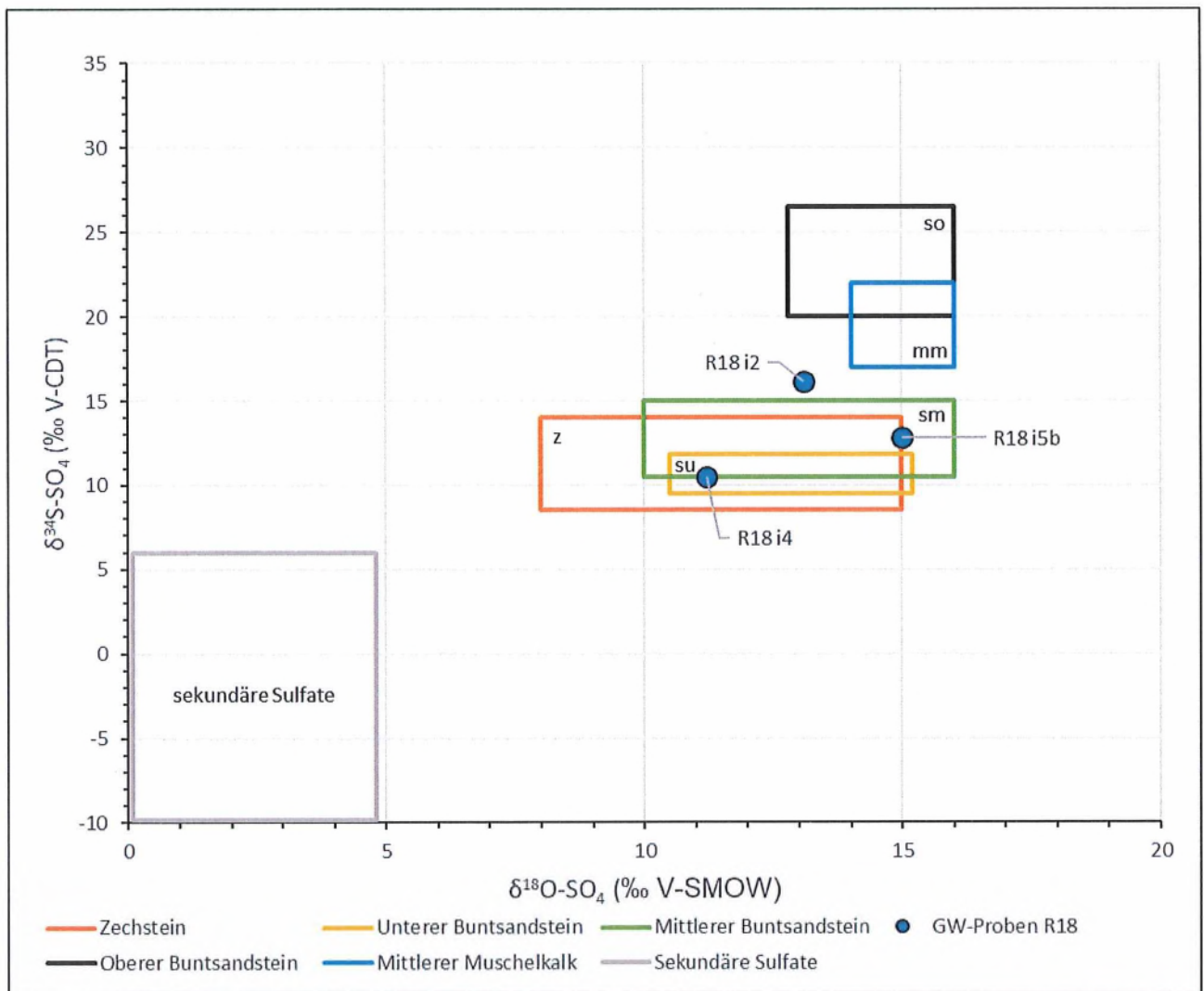


Abbildung 23: $\delta^{18}\text{O}-\delta^{34}\text{S}$ -Diagramm der Wasserproben aus der R18; mit Wertebereichen für Norddeutschland nach Angaben in den GSF-Berichten [36], Basis: [37], [38] und [33].

4.7.2.3.5 Strontiumisotopie

Das Verhältnis der beiden Strontium-Isotope ^{87}Sr zu ^{86}Sr kann zur Charakterisierung von potentiellen Fließpfaden und Gesteins-Wasser-Wechselwirkungen des beprobten Grundwassers verwendet werden. Der überwiegende Teil des stabilen ^{87}Sr ist radiogenen Ursprungs und entsteht durch den β -Zerfall des Rubidiumisotops ^{87}Rb (Halbwertszeit ca. 49 Mrd. Jahre), während das stabile ^{86}Sr

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 101
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

eine konstante Häufigkeit besitzt. Somit ist das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis einerseits vom Rb-Gehalt der Gesteine abhängig. Andererseits spiegelt es bei marinen sedimentären (Carbonat-) Gesteinen auch die Sr-Isotopie des Paläo-Meerwassers wider, das im Verlauf der Erdgeschichte charakteristische Schwankungen aufweist. Durch Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen wird Sr im Grundwasser gelöst. Dabei findet nahezu keine Fraktionierung der Sr-Isotope statt. Somit sind die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse des gelösten Sr^{2+} im Grundwasser primär abhängig von den Rb/Sr-Verhältnissen der Gesteine des GW-Leiters [39]. Mittels der Bestimmung des Sr-Gehalts kann mit dem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis zudem die Mischung verschiedener Grundwassertypen nachvollzogen werden. Das am gelösten Sr^{2+} gemessene Verhältnis der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotope wird dabei üblicherweise direkt ohne Bezug auf einen externen Standard angegeben.

Die beiden Wasserproben aus den Packerintervallen im Unteren Buntsandstein (R18-i2 und R18-i5b) zeigen vergleichbar hohe Werte der Isotopenverhältnisse. Die Probe aus dem Intervall im Residual (R18-i4) zeigt ein Isotopenverhältnis, welches vergleichbar mit den Ergebnissen der Isotopenanalysen an den Festgesteinsproben im Residual bzw. Zechstein ist (vgl. Kapitel 4.7.1):

- R18 i2: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70898 \pm 0,00003$
- R18 i4: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,708164 \pm 0,00003$
- R18 i5b: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,708837 \pm 0,00003$

4.7.3 Palynologische Untersuchungen

Durch das LBEG und die BGR wurden 12 Proben der Erkundungsbohrung Remlingen 18 nach einem säurefreien Verfahren, modifiziert nach Moss [40] palynologisch aufbereitet und analysiert (vgl. Tabelle 38). Ziel der Analyse ist eine biostratigraphische Einstufung der untersuchten Abschnitte auf Basis von Pollen, Sporen und Algen. Die Bestimmung und Nomenklatur der Palynomorphen beruht auf Heunisch [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47] Fijalkowska-Mader [48], die stratigraphische Einstufung auf Heunisch [49], Backhaus et al. [50] sowie Heunisch & Wierer [51].

Die Untersuchungsergebnisse sind im Anhang 2 aufgeführt und beschrieben. Für einen Großteil der Proben konnten keine stratigraphische Einstufung auf Basis der palynologischen Untersuchungen vorgenommen werden, so dass die stratigraphische Einordnung in diesen Bereich weiterhin auf Grundlage der vornehmlich visuellen geologischen Beschreibung basierend auf Erfahrung und typischen lithologischen Charakteristika sowie strukturgeologische Modellvorstellungen verbleibt.

Tabelle 38: Ergebnisse der palynologischen Untersuchungen auf Basis der Auswertung der Pollenanalysen in Gegenüberstellung der vorläufigen stratigraphischen Einordnung (vgl. Kapitel 4.2.4).

Probe	Teufe		Vorläufige Stratigraphische Einordnung	Stratigraphische Einstufung nach Pollenanalysen
	von [m]	bis [m]		
23As0217	6,00	8,00	Oberer Buntsandstein, Röt undifferenziert	Vermutlich Oberer Buntsandstein (Röt-Formation, so)
23As0202	17,53	17,55	Oberer Buntsandstein, Röt undifferenziert	Oberer Mittlerer Buntsandstein bis Oberer Buntsandstein (Solling-Formation bis Röt-Formation, smS – so)

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 102
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Probe	Teufe		Vorläufige Stratigraphische Einordnung	Stratigraphische Einstufung nach Pollenanalysen
	von [m]	bis [m]		
24As0386	394,55	394,56	Unterer Buntsandstein	Vermutlich Unterer Buntsandstein (Calvörde-Formation, su)
24As0387	395,45	395,47	Unterer Buntsandstein	Unterer Buntsandstein (Calvörde-Formation, su)
24As0388	398,73	398,79	Zechstein, Bröckelschiefer	Keine biostratigraphische Einstufung möglich
24As0389	400,46	400,47	Zechstein, Bröckelschiefer	
24As0390	405,58	405,60	Zechstein, Bröckelschiefer	
24As0391	406,19	406,23	Zechstein, Bröckelschiefer	
24As0392	418,67	418,73	Zechstein, Bröckelschiefer	
24As0393	426,85	426,92	Zechstein, Friesland-Ton	
24As0394	435,00	435,05	Residual	
24As0395	452,85	452,95	Residual	

4.8 Gesteinsmechanische Untersuchungen

4.8.1 Messprogramm und Messdurchführung

Ein zentrales Erkundungsziel der Bohrung R18 war die gebirgsmechanische Charakterisierung der im Bereich der Bohrachse angetroffenen Schichten zum Zweck, geeignete technische Mittel zum Abteufen des Schachtes 5 sowie des Schachtausbaus herzuleiten. Dafür wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig (IfG) ein Programm zur gesteinsmechanischen Untersuchung ausgewählter Bohrkernproben im Labor erarbeitet. Das IfG wurde von der BGE mit der Auswahl des Probenmaterials, der Durchführung und Auswertung der Laboruntersuchungen sowie der Erstellung gesteinsmechanischer Datensätze beauftragt. Ziele des Untersuchungsprogramms waren:

- Die geomechanische Charakterisierung des Deckgebirges (Ton-Schluffsteine, Gipssteine, Sandsteine) und des Salinars (Proben des Roten Salztons, des Tonmittelsalzes, des Schnee-/Rosen-/Basissalzes, des Anhydritmittelsalzes, des Bunt-/Bank-/Orange-/Linienalzes und des Pegmatitanhydrits)
- Die Bestimmung von petrologischen Eigenschaften: Uni- und triaxiale Festigkeit inklusive der Bestimmung der Mohr-Coulomb-Parameter, die elastischen und rheologischen Eigenschaften, die direkte und indirekte Zugfestigkeit sowie die Veränderlichkeit, Mineralogie und Abrasivität

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 103

Die Bohrkernkerne wurden noch am Bohrplatz pro geborgenem Kernmarsch in Schlauchfolie eingeschweißt, um eine möglichst geringe Beeinflussung durch Umweltbedingungen nach dem Bergen aus dem Kernrohr zu gewährleisten. Im Rahmen der geologischen Feldaufnahme wurden als erste Festigkeitsprobe Schmidt-Hammer-Tests im Abstand von 1 m durchgeführt und dokumentiert. Die Bohrkernkerne wurden bohrabschnittsweise ins Bohrkernlager der BGR in Hannover überführt.

Die Probenauswahl und Probennahme erfolgte im Rahmen von fünf Terminen zur Bohrkernbestimmung im Bohrkernlager der BGR in Hannover durch Mitarbeiter des IfG mit BGE, zeitnah nach Abteufen des jeweiligen Bohrlochabschnitts. In Summe wurden 88 Kernkisten zu je 1 m Länge an Bohrkernmaterial entnommen.

In Summe wurden 306 Einzeluntersuchungen im Labor durch am IfG an den Proben durchgeführt oder veranlasst:

- Ermittlung der Rohdichte, Trockendichte, Korndichte, Wassergehalt, Porosität und Sättigungsgrad
- Präparation der Proben aus Bohrkernsegmenten für das Labor
- Felsmechanische Kurzzeitversuche zur Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit, der Elastizitätsmoduln, Scherfestigkeit, Dehnung und des Deformationsverhaltens:
 - Uniaxiale Druckversuche (UCS) (43 Stück)
 - Triaxiale Druckversuche (TCS) und triaxiale Mehrstufen-Druckversuche (TCMS) (101 Stück)
 - Spaltzugversuche (SZ) und direkte Haftzugversuche (53 Stück)
- Felsmechanische Langzeitversuche zur Bestimmung der Rheologie und des Verformungsverhaltens des Gebirges über lange Zeiträume:
 - speziell triaxiale (Druck-) Kriechversuche (TCC) (21 Stück)
- Cerchar-Abrasivitätsindex (CAI) zur Bestimmung der Verschleißwirkung des Gesteins auf das Gebirge bearbeitende Werkzeuge, durchgeführt durch PG - Dr. Plinninger Geotechnik im Auftrag des IfG (28 Stück)
- Bestimmung der Veränderlichkeit zur Einschätzung des Materialverhaltens bei Durchfeuchtung (31 Stück)
- Röntgen-Diffraktometrie (XRD) zur qualitativen und quantitativen Bestimmung des Mineralphasenbestandes, durchgeführt durch K-UTEC SALT TECHNOLOGIES im Auftrag des IfG (29 Stück)

Anhand des gewonnenen Bohrkernmaterials wurden zylindrische Prüfkörper mit jeweils zum Versuchstyp passender Geometrie für die durchzuführenden felsmechanischen Untersuchungen hergestellt und die jeweilige Dichte, Integrität und Homogenität der einzelnen Proben ermittelt. Für die Versuche selbst wurden unterschiedliche Testapparaturen eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsaufbau und -abläufe sowie detaillierte Beschreibung der felsmechanischen Untersuchungen findet sich im Abschlussbericht IfG [32]. Die Versuche erfolgten in Anlehnung an die Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT).

In Folge der unterschiedlichen lithologischen Charakteristika und petrophysikalischen Eigenschaften wurden unabhängig der Teufenlage und Mächtigkeit im Vorfeld der Untersuchungen verschiedene Lithotypen definiert, die in Tabelle 39 dargestellt sind.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 104
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 39: Übersicht der definierten Lithotypen (SU2 nicht untersucht).

Lithotyp	Gebirgsbereich	Kurzbeschreibung
SO1	Deckgebirge	Ton-Schluffstein, rotbraun, vereinzelt grau, stark verfaltet
SO2	Deckgebirge	Gipsstein, dunkel- bis hellgrau, mit Tonsteineinlagen, stark verfaltet
SU1	Deckgebirge	Ton-Schluffstein, rotbraun, vereinzelt grau, einheitliche Lagerung
SU2	Deckgebirge	Sandstein („Rogenstein“), oolithisch
SU3	Deckgebirge	Ton-Schluffstein, rotbraun, vereinzelt grau, wechselnde Lagerung
Zechstein-Residual	Residual	Ton-Schluffstein, rotbraun, gering fest, mit festen Anhydritblöcken
Steinsalz	Zechsteinsalinar	Steinsalz (Leine- und Aller-Serien des Zechsteins), rötlich-weißlich
Roter Salzton	Zechsteinsalinar	Ton-Schluffstein, rotbraun
Pegmatitanhydrit	Zechsteinsalinar	Anhydritstein, weißgrau

4.8.2 Ergebnisse

Das für die felsmechanischen Untersuchungen gewonnene Material sowohl aus dem Deckgebirge, dem Residual als auch dem Salinar wurde im Allgemeinen kompakt und intakt beschrieben. Die Proben aus dem Deckgebirge waren teilweise geprägt durch überwiegend steil einfallende bis beinahe senkrechte Schichtung (parallel zur Bohrlochachse). Außerdem konnte in einigen Bereichen Akkumulationen von sekundären Mineralbestandteilen festgestellt werden.

Die **mineralogische Zusammensetzung** wurde nur für Proben aus dem Deckgebirge bestimmt. Proben des Salinars werden als sehr homogen in ihrer mineralogischen Zusammensetzung angesehen. Anhand der röntgendiffraktometrischen Untersuchungen wurde eine stark variierende Zusammensetzung der Proben aus dem Deckgebirge festgestellt. Die Proben sind weitestgehend aus festen (Quarz, Albit Orthoklas, Hämatit, Analcim, Anhydrit, Mikroklin), aber auch geringfesten (Gips, Muskovit, Chamosit, Bassanit) Mineralphasen zusammengesetzt, während mittelfeste Phasen (Dolomit, Halit, Calcit, Magnesit) selten vorkommen. In höheren Teufenlagen oberhalb 150 m treten eher feste Mineralphasen auf als in Proben aus tieferen Lagen, in denen eher geringfeste Phasen vorherrschen.

Die **Veränderlichkeit** des Probenmaterials wurde qualitativ in Grad 1 bis 5 – von keiner sichtbaren Veränderung über Verringerung der Festigkeit, Bildung von Rissen, Ablösungserscheinungen bis zum Zerfall der Probe – beschrieben und wurde durch vollständige Lagerung in Wasser für 24 Stunden ermittelt. Material der Lithotypen SO1 und SO2 zeigte kaum bis gar keine Veränderlichkeit, demgegenüber erschienen die Lithotypen SU1 und SU3 deutlich verändert. Ton-Schluffstein des Zechstein-Residuals und des Roten Salzton reagieren besonders stark. Material des Salinars wurde nicht auf diese Weise beprobt.

Im generellen Trend variiert die Veränderlichkeit der Proben im Deckgebirge von nicht bis stark veränderlich, geht jedoch mit zunehmender Teufe in den stark veränderlichen Bereich. Als lithologisch übergreifende Tendenz konnte eine zunehmende Veränderlichkeit der Proben auf Lagerung in Wasser mit zunehmender Teufe der Bohrkerns korreliert werden (vgl. Abbildung 24).

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 105

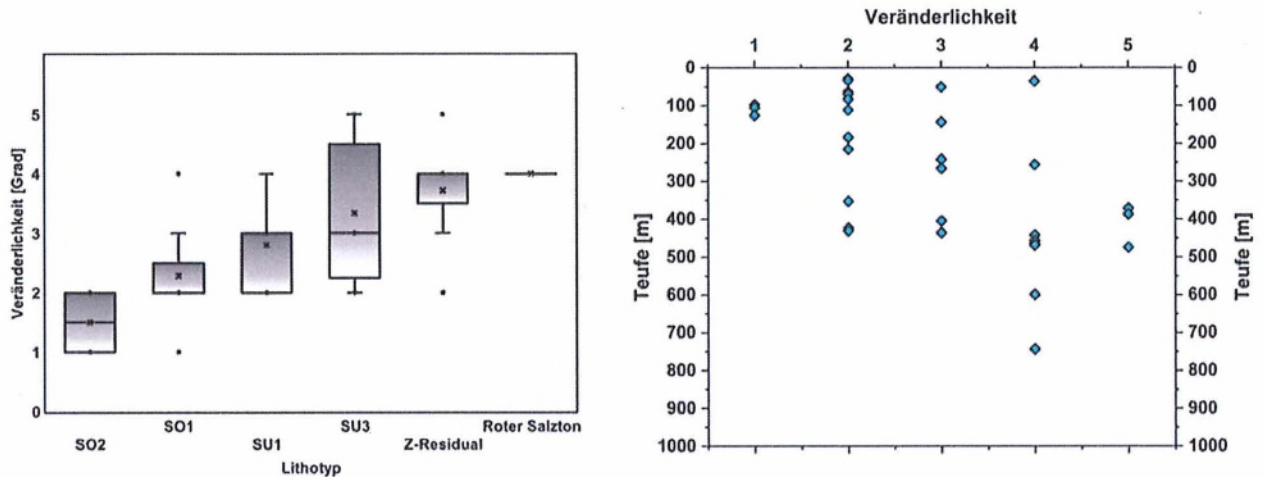


Abbildung 24: Grad der Veränderlichkeit der untersuchten Lithotypen (links) und Darstellung der Veränderlichkeit in Abhängigkeit der Teufe (rechts).

Die Beschreibung der Veränderlichkeit der einzelnen Proben erfolgt in [32].

Die **Abrasivität** als Maß des Abriebverhaltens des Materials wurde ebenfalls nur an Proben des Deckgebirges getestet. Insgesamt zeigten die Ergebnisse aller untersuchten Lithotypen „extrem geringe“ bzw. „sehr geringe“ Abrasivität war und nur in zwei Ausnahmefällen (bei Material vom Lithotyp SO1 und SU1) eine niedrige respektive mittlere Abrasivität. Ein Zusammenhang zwischen bestimmter Abrasivität und Teufe konnte nicht festgestellt werden. Eine detaillierte Übersicht, welche sowohl die Teufe, den Lithotyp, den Index (CAI) und die Klassifizierung aller untersuchten Proben beinhaltet, ist in [32] aufgeführt.

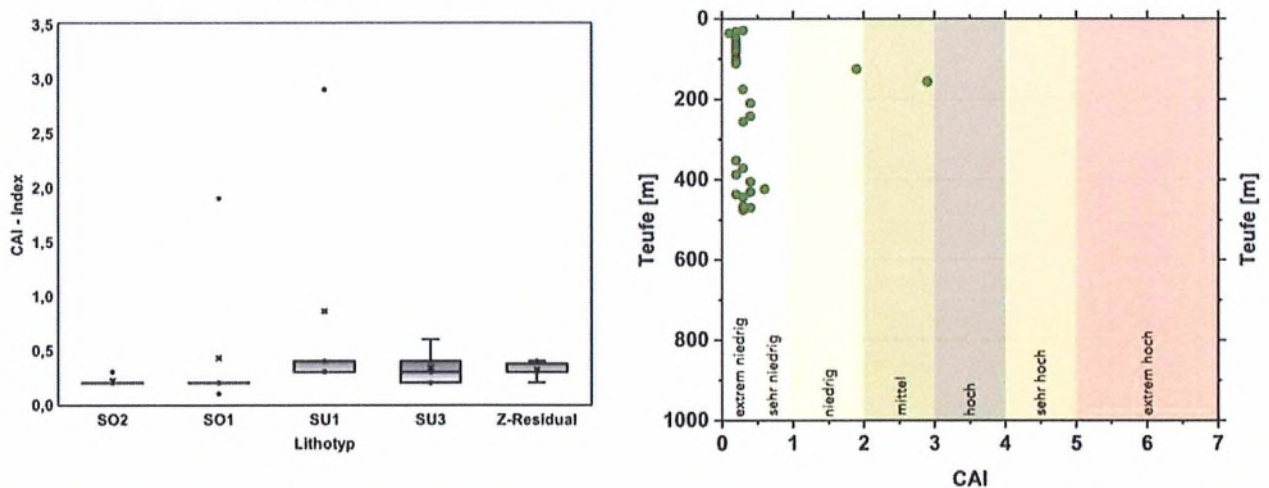


Abbildung 25: Abrasivitätsindex (CAI) der untersuchten Lithotypen (links) und Darstellung in Abhängigkeit der Teufe (rechts).

Die durchschnittliche **Dichte** des gesammelten Probenmaterials variiert stark mit der Teufe. Im Deckgebirge verteilt sich die Dichte bis ca. 300 m von 2,2 – 2,45 g/cm³ (mit vereinzelt höheren Dichtewerten bei Anhydrit-Proben). Unterhalb 300 m bis zum Salzspiegel liegt die Mehrzahl der Proben bei 2,2 – 2,3 g/cm³. Im Salinar liegt die Dichte eines Großteils der Proben

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 106
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

knapp unterhalb von 2,2 g/cm³, mit Abweichungen zu höherer Dichte von mehreren Einzelproben von bis zu 2,7 g/cm³. Die gilt insbesondere für Material des Roten Salztons.

Die **einaxiale Druckfestigkeit** wurde zur Ermittlung der maximalen Axialspannung bis zum mechanischen Versagen des Prüfkörpers getestet. Aus diesen Tests wurden gesteinsphysikalische Kennwerte wie der Elastizitätsmodul, Schubmodul sowie die Querdehnung bzw. aus der radialen Verformung des Prüfkörpers die Dehnung des Materials normal zur Spannungsachse ermittelt. Die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit sowie der elastischen Elastizitätsmodul sind für die jeweiligen Lithotypen in Tabelle 40 zusammengefasst.

Material aus dem Deckgebirge reagiert in diesem Versuch eher spröde und bildet bei Überschreiten der maximalen uniaxialen Druckfestigkeit einen Makroriss in der Probe aus. Material des Salinars hingegen verformt sich eher duktil durch das Zusammenwachsen vieler Mikrorisse und Erhöhung des Probenquerschnitts – der zylindrische Probenkörper bildet einen fassförmigen Bauch aus.

Tabelle 40: Zusammenfassung der für die jeweiligen Lithotypen ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten und elastischen Elastizitätsmoduln.

Lithotyp	Anzahl Versuche	einaxiale Druckfestigkeit (σ_{UCS}), [MPa]	elastische Elastizitätsmoduln (E), [GPa]
SO1	6	2,15 – 33,18	0,98 – 15,60
SO2	5	3,86 – 28,04	2,51 – 30,12
SU1	5	10,85 – 25,13	4,14 – 6,37
SU3	6	0,67 – 14,33	0,04 – 3,04
Zechstein-Residual	6	0,73 – 8,57	0,07 – 6,95
Steinsalz	12	24,68 – 29,37	6,85 – 15,39
Roter Salztton	2	7,08 – 12,70	1,48 – 7,60
Pegmatitanhydrit	1	57,08	21,96

Eine klare Korrelation von Dichte und einaxialer Druckfestigkeit ist nicht erkennbar. Es ist allerdings ersichtlich, dass die Variabilität der Dichte und einaxialer Druckfestigkeit der Steinsalzproben wesentlich geringer ist als die der Deckgebirgsproben. Dieser Umstand ist hauptsächlich auf die mineralogische Zusammensetzung und die damit einhergehende Mikrostruktur zurückzuführen. Während sich die Steinsalzproben teils aus nur sehr wenigen unterschiedlichen Mineralphasen zusammensetzen, besteht das Gesteinsmaterial aus dem Deckgebirge aus einer Vielzahl unterschiedlicher Minerale.

Zwischen der ebenfalls ermittelten Querdehnungszahl (Verhältnis von radialer zu axialer Verformung) und dem statischen E-Modul hingegen zeichnet sich eine reziproke Beziehung ab: je höher der E-Modul, desto geringer die Querdehnung des Materials. Dies deutet auf einen Übergang von

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 107
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

spröder zu duktiler Verformung hin. Eine klare Korrelation zwischen maximaler uniaxialer Druckfestigkeit und Teufe und E-Modul ist nicht erkennbar.

Die **Triaxialen Druckfestigkeitsversuche** wurden zur Ermittlung der Verformung und Scherfestigkeit der Probe durchgeführt. Die Probe wurde hier mit einer konstanten axialen Spannung beaufschlagt, während der gesamte Probenkörper über ein druckbeaufschlagtes Testfluid (Öl) radial eingespannt wurde. Die maximale Axialspannung wurde bei Materialversagen (Bruch der Probe) erreicht. Die Ergebnisse der triaxialen Druckfestigkeit sowie der elastischen Elastizitätsmoduln sind für die jeweiligen Lithotypen in Tabelle 41 zusammengefasst.

In diesen Versuchen wurde wie in den uniaxialen Druckfestigkeitsversuchen ein sprödes Verformungsverhalten des Deckgebirges nachgewiesen. Ebenso findet sich hier das eher duktile Verhalten des Salinars wieder. Sowohl bei den Proben aus dem Deckgebirge wie denen aus dem Salinar lässt sich eine direkte Abhängigkeit von Axialspannung und Manteldruck und ein Trend von sprödem zu eher duktilen Verhalten mit zunehmendem Manteldruck erkennen. Mit Hilfe des Bruchkriteriums nach Mohr-Coulomb lassen sich vor allem im Deckgebirge die Reibungsparameter Kohäsion und Reibungswinkel bestimmen, wobei dies für das Salinar aufgrund seiner hohen Duktilität jedoch nur eingeschränkt gilt.

Tabelle 41: Zusammenfassung der für die jeweiligen Lithotypen ermittelten triaxialen Druckfestigkeiten (Einstufen-Versuch) und elastischen Elastizitätsmoduln.

Lithotyp	Anzahl Versuche	dreiaxiale Druckfestigkeit (σ_{TCS}), [MPa]	elastische Elastizitätsmoduli (E), [GPa]
SO1	8	3,67 – 17,15	0,6 – 9,2
SO2	8	10,24 – 20,9	2,8 – 16,0
SU1	10	20,88 – 44,73	3,1 – 6,8
SU3	2	19,79 – 23,19	3,3 – 3,8
Zechstein-Residual	-		
Steinsalz	39	27,90 – 66,97	1,0 – 15,4
Roter Salzton	8	18,29 – 32,92	2,8 – 5,5
Pegmatitanhydrit	3	62,63 – 93,30	14,0 – 26,3

Für den Wert der maximalen Axialspannung wurde ein Anstieg mit zunehmender Teufe im Deckgebirge festgestellt. Innerhalb der Salzformationen ergab sich eine starke Streuung der Werte unabhängig von der Teufe. Auch hier zeigt sich eine positive Korrelation des Elastizitätsmoduls zur Triaxialen Druckfestigkeit, nicht jedoch zur Dichte.

Des Weiteren wurden **Triaxiale Mehrstufen-Druckversuche** mit ähnlichem Versuchsaufbau durchgeführt, die die Beobachtungen aus den Triaxialen Druckfestigkeitsversuchen bestätigten (vgl. Tabelle 42).

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 108
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 42: Zusammenfassung der für die jeweiligen Lithotypen ermittelten triaxialen Druckfestigkeiten (Mehrstufen-Versuch) und elastischen Elastizitätsmoduli.

Lithotyp	Anzahl Versuche	dreiachiale Druckfestigkeit (σ_{TCS}) [MPa]	elastische Elastizitätsmoduln (E) [GPa]	Reibungswinkel (φ) [°]	Kohäsion [MPa]
SO1	6	4,29 – 25,65	0,95 – 11,32	35	1,75
SO2	3	5,59 – 52,71	1,99 – 30,38	21	1,62
SU1	2	13,62 – 28,41	4,97 – 5,60	32	3,70
SU3	4	4,04 – 71,36	0,55 – 16,41	25	0,9
Zechstein-Residual	6	1,09 – 37,65	0,67 – 15,18	23	7,97
Steinsalz	-				
Roter Salzton	-				
Pegmatitanhydrit	2	50,03 – 71,85	36,25 – 39,77	39	11,08

Vergleichbar zu den einaxialen Druckfestigkeiten lässt sich für die ein- und mehrstufigen triaxialen Versuche bei den Deckgebirgsproben die Kompensation der Deformation in axialer Richtung durch Ausbildung eines großen Makrorisses beobachten. Dahingegen verformen die Steinsalzproben duktil und bilden eine fassförmige Geometrie aus, um die axiale Verkürzung auszugleichen.

Ebenfalls vergleichbar ist der positive Zusammenhang zwischen dreiachialer Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul sowie die mit zunehmender Teufe ebenfalls zunehmende Axialspannung.

Die **Zugfestigkeit** des Materials wurde durch direkte Haftzug- und indirekte Spaltzugversuche in zwei verschiedenen Versuchsaufbauten ermittelt. Diese dienen zur Ermittlung des Maximums der Materialfestigkeit und des Versagensverhaltens bei direkt aufgebrachtener Zugkraft und bei Zugspannung durch Querdehnung des Materials normal zu einem Zusammenpressen des Versuchskörpers. Die bei Materialversagen auftretende Rissbildung wurde dokumentiert.

Bei direkter Zugbelastung erwiesen sich Flächen entlang von Schichtfolgen oder natürlicher Schwächezonen. Die ermittelten (direkten) Zugfestigkeiten (Tabelle 43) zeigen keinen Zusammenhang zur Teufe oder Dichte.

Bei indirekter Zugbelastung, bei der der Probenkörper von zwei gegenüberliegenden Seiten streifenförmig belastet und dadurch in Querrichtung gedehnt wurde, schwankten die ermittelten Zugfestigkeiten zwischen 0,1 und 3,5 MPa (vgl. Tabelle 43). Hier konnte eine schwache, positive Abhängigkeit zur Dichte beobachtet werden. Auch bei diesen Versuchen war keine Beziehung zwischen Zugfestigkeit und Teufe erkennbar.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 109
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 43: Zusammenfassung der für die jeweiligen Lithotypen mittels indirekten bzw. direkten Zugversuchen ermittelten Zugfestigkeiten.

Lithotyp	Anzahl Versuche	indirekte Zugversuche	direkte Zugversuche
		Zugfestigkeit (σ_t) [MPa]	
SO1	-		
SO2	4	1,14 – 3,44	
SU1	8	0,88 – 2,89	
SU3	7	0,08 – 0,58	
Zechstein-Residual	6	0,07 – 1,16	
Steinsalz	15		0,40 – 2,64
Roter Salzton	2		0,64 – 0,86
Pegmatitanhydrit	3		1,62 – 2,50

Die **rheologischen Eigenschaften** (Kriechversuche) wurden ebenfalls in einer mit Öl gefüllten Druckzelle unter triaxialer Kompression bei konstanten p/t-Bedingungen über den gesamten Versuchszeitraum durchgeführt. Mit den Kriechversuchen wurden die konstanten Verformungsraten der Prüfkörper abhängig von einer aufliegenden Axialspannung aufgezeichnet und liefern Aussagen zum langzeitlichen Verformungsverhalten des Gebirges und der Auswirkung auf die Standsicherheit des Schachtes.

4.9 Spülungsverluste und Spülungsspiegel

Anhand der bei den Bohrarbeiten erhobenen Spülungsverluste und des Spülungsspiegels können Ableitungen zu den hydraulisch-hydrogeologischen Gegebenheiten und insbesondere zu Transmissivitäten und Lösungsdrücken in der Formation entlang der Bohrung gemacht werden.

Für die Erkundungsbohrung R18 wurden zu verschiedenen Zeiten der Spülungsspiegel in der stehenden Bohrung gemessen. Dies erfolgte in der Regel im Vorfeld der hydraulischen Messungen. Die Messungen sind in den Anhängen des Abschlussberichts der hydraulischen Messungen [16] in der R18 dargestellt und im Kontext der hydraulischen Messungen ausgewertet.

Die Angabe der Spülungsverluste in der Erkundungsbohrung R18 gründet einerseits auf dem Pegel im Spülungstank bzw. der Menge an nachgefüllter Spülung und andererseits auf der Lotung der Spülungssäule in der offenen bzw. verrohrten Bohrung bei ruhenden Bohrarbeiten. Mittels der Differenz zwischen zwei Pegelmessungen bzw. Lotungen wurde der Verlust quantitativ bestimmt.

Signifikante Spülungsverluste treten dann auf, wenn die hydraulische Durchlässigkeit bzw. Transmissivität des durch die Bohrung erschlossenen Gebirgsbereichs so hoch ist, dass aufgrund des Druckgradienten messbare Mengen an Spülung in die Formation fließen können. Prinzipiell ist das Auftreten und die Höhe des Spülungsverlustes nach Darcy direkt abhängig vom Überdruck der

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 110

Spülungssäule im Verhältnis zum Formationsdruck sowie von der Transmissivität / hydraulischen Durchlässigkeit des offenen Bohrlochabschnitts. Wobei auch die abdichtende Wirkung der Bohrspülung berücksichtigt werden muss, d. h. des sich an der Bohrlochwand durch die suspendierten Bentonitpartikel, die Polymeradditive und das Bohrkleins ausbildenden Filterkuchens.

Bei den Bohrarbeiten sind in zwei deutlich abgrenzbaren Tiefenbereichen signifikante Spülungsverluste aufgetreten, während in den übrigen Bohrabschnitten keine nachweisbaren Spülungsverluste beobachtet wurden:

- (1) Teufenbereich zwischen ca. 20 – 25 m (erster Bohrlochabschnitt) während Kernbohren (20.-24.10.2023), Bohrlochmessungen (25.-27.10.2023) und Bohrlocherweiterung (31.10.-04.11.2023): kumulierte Summe 338,8 m³
- (2) Teufenbereich zwischen 459,5 – 480 m (R18 (1.)) bzw. 525 m (R18 (2.)) (dritter Bohrlochabschnitt) ebenfalls während Kernbohrens, Bohrlochmessungen, Zementations- und Verlustbekämpfungsmaßnahmen und dem Erweiterungsbohren (Zeitraum 18.01. – 06.04.2024): kumulierte Summe 1299,3 m³.

Zur Eingrenzung der tatsächlichen Verlustbereiche innerhalb dieser beiden Horizonte sind die Berücksichtigung weiterer geophysikalischer Daten und Auswertungen, sowie die Ergebnisse der Bohrkernaufnahmen notwendig. Integrativ ist dies in Kapitel 5.3.1 im Rahmen der hydrostratigraphischen Gliederung der R18 dargestellt und die wahrscheinlichen Verlustbereiche abgeleitet.

Insgesamt sind die Bohrabschnitte mit nachweisbaren und auch signifikant hohen Spülungsverlusten in der Erkundungsbohrung R18 auf einen oberflächennahen, verkarsteten Bereich (1) sowie einen Bereich oberhalb des Salzspiegels im Residual beschränkt (2).

Betrachtet wurde ausschließlich der Bohrungsabschnitt im Deckgebirge bis zur Absetzteufe des dritten Bohrlochabschnitts in ca. 525 m Tiefe. Im unterlagernden Zechsteinsalinar haben sich keine Hinweise auf Spülungsverluste ergeben.

4.10 Sorptionsanalysen

Für die Abschätzung radiologischer Auswirkungen bei einem (teilweisen) Verbleib radioaktiver Abfälle in der Schachanlage Asse II sind u. a. Untersuchungen zur Bestimmung der Rückhaltefähigkeit (Sorptionseigenschaften) des Deckgebirges notwendig. Die aus der Untersuchung des Deckgebirges an Bohrkernen aus der Tiefenbohrung Remlingen 15 gewonnenen Daten sollen durch Anwendung eines analogen Untersuchungsprogramms an Bohrkernmaterial aus der Erkundungsbohrung R18 komplementiert werden.

Die Probennahmen erfolgten durch die BGR und die BGE gemäß des Probenahmekonzepts durch KIT-INE. Die Handstücke sind 20 – 30 cm groß, kompakt und für die Präparation chemisch ungestörter, zentraler Probenkerne geeignet. Um Luftkontakt zu vermeiden, wurden die Bohrkernstücke schnellstmöglich in Schlauchfolie verpackt, mit Argon-Inertgas befüllt und gasdicht verschweißt. Anschließend wurden diese in Argon-gefüllte Autoklaven eingebracht, die vorab vom KIT-INE bereitgestellt wurden. Diese wurden bei kalten Außentemperaturen im Lagercontainer auf dem Bohrplatz und im KIT-INE im Kühlschrank bei 4°C gelagert. Insgesamt wurden 16 Proben aus den unterschiedlichen Lithologien sowie dem Residualgestein KIT-INE übergeben (vgl. Tabelle 44). Darunter stammen zwei Proben aus der Bohrspülungsverlustzone (462 - 490 m), da für die Migration von Radionukliden Gesteine aus Störungszonen von herausragender Bedeutung sind.

Ermittelt werden u. a. primäre und minore Mineralphasen, Haupt- und Spurenelemente (darunter Anionen), anorganische und organische Kohlenstoffgehalte, Kationenaustauschkapazitäten, Ton-Charakteristika und spezifische Oberflächen. Hierfür kommen unterschiedliche Analysemethoden

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 111
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

wie Rasterelektronenmikroskopie, Röntgenstrahldiffraktometrie, Röntgenfluoreszenzanalyse, Ionenchromatografie, Massenspektrometrie, optische Emissionsspektrometrie und BET-Analysen zur Anwendung. Die Gesteins-Charakterisierungen und Sorptionsuntersuchungen verlangen unterschiedliche Präparationsmethoden: Unterschiedliche Kornfraktionen werden mittels einer Vibrationsmühle und Lochsiebsätzen hergestellt, während mittels einer Gesteinssäge größere Probenstücke präpariert werden. Um eine Kontamination mit Luft zu vermeiden, erfolgen alle Arbeiten in einer Handschuhbox unter Inertgas-Atmosphäre (Ar). Für die Sorptionsuntersuchungen potentiell relevante Elemente im Grundwasser (z. B. an-/organischer Kohlenstoff, Eisen, Schwefel, Kationen wie Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Anionen wie Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, Br⁻), werden mittels chemischer Analysemethoden wie Ionenchromatografie und Massenspektrometrie bestimmt. Hinzukommend werden geochemische Parameter (pH, Eh, etc.) des Grundwassers ermittelt.

Die Arbeiten und Ergebnisse bezüglich der Charakterisierung der Gesteine sowie des Grundwassers werden separaten Berichten durch KIT-INE nach Abschluss der Langzeitversuche beschrieben.

Tabelle 44: Am Bohrkern der R18 entnommene Proben zur Sorptionsanalyse durch das KIT-INE.

Probe	Probenehmer	Datum	Teufe [m]		
			von	bis	
23As0203	BGR	18.12.2023	119,21	119,67	
23As0204		18.12.2023	119,67	119,86	
23As0205		18.12.2023	121,22	121,44	
23As0206		18.12.2023	121,93	122,13	
23As0207		18.12.2023	114,41	114,82	
23As0218		19.12.2023	159,24	159,45	
23As0219		19.12.2023	151,35	151,53	
23As0220		19.12.2023	228,82	229,06	
23As0221		19.12.2023	86,64	86,90	
23As0222		19.12.2023	107,18	107,55	
23As0223		19.12.2023	193,76	194,02	
R18-2024-01-12-#01		BGE	12.01.2024	351,75	352,15
R18-2024-01-15-#02			15.01.2024	424,89	425,00
R18-2024-01-15-#03	15.01.2024		421,88	422,19	
R18-2024-01-15-#04	14.02.2024		462,10	462,40	
R18-2024-01-15-#05	14.02.2024		471,25	471,55	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 112

5 Integrative Auswertung

Mit Blick auf die schachtplanerischen Fragestellungen zur geologischen, strukturgeologischen, hydrogeologischen und gebirgsmechanischen Situation werden die Ergebnisse der verschiedenen Bohrlochmessungen und weiteren Untersuchungen sowie der vorhandenen Datenlage im Folgenden übergreifend betrachtet und gegenübergestellt. Eine Bewertung dieser Ergebnisse für die Schachtplanung oder den Schachtansatzpunkt erfolgt an dieser Stelle nicht.

5.1 Geologische Abfolge/Aufbau

Mit der Erkundungsbohrung R18 wurden die Gesteinseinheiten des Oberen und Unteren Buntsandsteins, vornehmlich dem Zechstein zugeordnetes aufgearbeitetes Material im sog. Residualbereich sowie die Aller- und Leine-Folge des Zechsteins durchteuft. Die durchhörte Schichtenfolge ist als Litholog in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt.

Im Ergebnis einer detaillierten Kernbeschreibung in Ergänzung zur feldgeologischen Aufnahme lässt sich im Oberen Buntsandstein eine Untergliederung der Rötformation vornehmen.

- Röt 4: 16,2 m bis 34,9 m
- Röt 3: 34,9 m bis 89,5 m
- Röt 2: 89,5 m bis 108,3 m

Der in den oberen zehn Metern angetroffene Röt 4 steht im Kontext zu den Ergebnissen der geologischen Aufnahme während der Arbeiten zur Erstellung des Bohrplatzes, wonach an der Oberfläche die Grenze zwischen Unterem Muschelkalk und Oberem Buntsandstein nur wenige Meter südlich des Bohransatzpunktes angetroffen wurde. Die Einstufung als Röt 4 basiert vornehmlich auf den zwischen etwa 30 – 35 m identifizierten Gipslagen. Zwar sind auf der Asse bislang keine Sulfate im Röt 4 beschrieben bzw. aufgrund der schlechten Aufschlussituation des Röt 4 im Bereich der Salzstruktur mit Unsicherheiten behaftet. Dennoch treten im östlichen Teil des Subherzynen Beckens mehrere Sulfat-Einlagerungen im oberen Röt auf und erlauben die vorgenommene Einordnung in Röt 4. Die Ergebnisse der palynologischen Untersuchung (siehe Tabelle 38) widersprechen diesem Vorgehen nicht, gleichwohl sie die Einordnung allgemein in den Oberen Buntsandstein bestätigen. Eine ebenfalls aufgrund der palynologischen Analyse mögliche Einordnung in den oberen Mittleren Buntsandstein wird unter Berücksichtigung der Befunde aus Kartierarbeiten und der geologischen Aufnahme des Bohrplatzes ausgeschlossen.

Die weitere Untergliederung der Abfolge in Röt 3 und Röt 2 basiert im Wesentlichen auf lithologischen Charakteristika. Eine Untersuchung auf Pollen wurde bislang aufgrund der weitgehend gesicherten Einordnung nicht vorgenommen. Hinsichtlich des als Röt 2 angesprochenen Abschnitts ist davon auszugehen, dass nicht die vollständige Abfolge des Röt 2 mit der Bohrung erschlossen wurde. Gestützt wird diese Annahme durch die strukturgeologische Interpretation. Die Röttone und der Rötanhydrit des Röt 1 fehlen in der erbohrten Schichtfolge vollständig. Hierfür lassen sich allerdings vorwiegend strukturgenetische Gründe finden (siehe Kapitel 5.2.1).

Basierend auf den Beschreibungen der Bohrkerne im Bereich 109 m bis 123 m, die neben z.T. plastischen Zuständen der Tonsteine auch von boudinierten Lagen und mylonitisierten Bereichen sprechen, und den Angaben der Bohrkernaufnahme bei 126 – 132,5 m (Frakturen/Störungsbahnen, brüchig) kann in Verbindung mit dem ABI- und bedingt dem NMR-Log aufgrund variierender Schichteinfallrichtungen und erhöhter Porositäten ein bis etwa 135 m Tiefe gestörter Bereich unterstellt werden.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 113

In diesen Teufenbereich fällt der Übergang von Oberem zu Unterem Buntsandstein, der sich teufenmäßig nur bedingt anhand der Lithologie bestimmen lässt. Ab 120/123 m erfolgt ein Wechsel zu hellen Sandsteinen, im Wechsel mit graugrünem Tonstein. Eingeschaltet sind geringmächtige, schwach verfestigte Sandsteinlagen/-bänke (teilweise zu lockerem Sand zerbohrt). Eine gesicherte stratigraphische Zuordnung lässt sich derzeit nicht treffen. Auch eine Einordnung in den Mittleren Buntsandstein ist rein aufgrund der lithologischen Befunde möglich, allerdings kann es sich hierbei bereits um eine lokale sandige Faziesvariation im Bereich der Rogensteinzone (Unterer Buntsandstein) handeln. Dementsprechend wäre die Grenze Oberer/Unterer Buntsandstein frühestens bei ca. 120 m zu legen.

Bei 130,3 m Teufe wurden erste Ooide (mit Lupe erkennbar) in Kalksandstein-Lagen deutlich. In der Bohrung wurden jedoch keine Abschnitte durchteuft, deren lithologische Ausbildung eine zweifelsfreie Zuordnung zum oberen Abschnitt des Unteren Buntsandsteins (Tonstein-Wechselfolge, im Bereich derASSE 40 – 50 m mächtig) mit mehreren, bis zu ein Meter mächtigen Hauptrogensteinbänken ermöglicht. Das Fehlen dieses oberen Abschnitts in dem Bohrungsaufschluss ist der struktureologischen Situation durch den störungsbedingten Übergang von Oberen in Unteren Buntsandstein sowie auch der jeweils unterschiedlichen Schichteinfallrichtungen auf beiden Seiten der Störungszone geschuldet.

Auf Grundlage der lithologischen Beschreibungen und der Pollenanalysen (vgl. Kapitel 4.7.3) lässt sich im Weiteren bis etwa 395,5 m gesichert Unterer Buntsandstein ausweisen (vgl. Tabelle 38). Ebenfalls gesichert ist, dass mit Auftreten der Anhydritlage bei 427,1 m [2] Zechsteinmaterial angetroffen und als Ohre-Anhydrit angesprochen wurde.

Für den Bereich zwischen 395,5 m und 427,1 m erlauben die rein lithologischen Befunde sowohl eine Zuordnung zum Unteren Buntsandstein als auch die Annahme, dass hierbei die Einheiten des Bröckelschiefers und/oder Friesland-Tons präsent sein können. Letztere wurde dann zunächst in der vorläufigen lithostratigraphischen Einordnung zum Ausdruck gebracht (vgl. Kapitel 4.2.4, Tabelle 6 und Tabelle 7).

In der Gesamtschau der Bohrkerne in Verbindung mit einer Detailbetrachtung der Kerne, der Zugrundelegung der Zechstein-Monographie der SDGG sowie der Bohrlochgeophysik und unter Berücksichtigung des fast vollständigen Fehlens von organischem Material bei den Pollenanalysen (vgl. Kapitel 4.7.3) bzw. Anhang 2) wurde sich auf das Auftreten von der Fulda- und Friesland-Formation verständigt. Dieser Rückschluss erfolgt auch unter der Annahme, dass auf der Nordflanke das Normalprofil der Abfolge Buntsandstein – Zechstein weitgehend ungestört vorliegt und beinhaltet ebenfalls die Ergebnisse der Remlingen 9.

Unterhalb der bei 472,1 m angetroffenen Anhydrit-Lage markieren die vorwiegend massigen, weitgehend gefügelosen und plastisch beschriebenen Tonsteine ab etwa 427,9 m (unter Berücksichtigung der Gesteinshärte ggf. bereits ab 423 m) den Beginn des Residualbereichs. Die Einschaltungen von sulfatischen Klasten erfolgt unregelmäßig und lateral unbeständig. Lokal sind löchrige Strukturen im plastischen Tonstein zu erkennen, was das Herauslösen evaporitischer Klasten/Einlagerungen andeutet. Diese Beschreibung setzt sich fort bis zum Antreffen von deutlich erkennbaren Steinsalz bei 479,2 m in der ursprünglichen Bohrspur der R18 (1.) bzw. 490,2 m in der vertikal gerichteten und ab 486 m erneut gekernten R18 (2.).

Die bisherigen geologischen Laboruntersuchungen (Geochemie, Pollenanalysen, vgl. Kapitel 4.7) widersprechen dem vorläufigen lithostratigraphischen Profil (vgl. Kapitel 4.2.4) bislang nicht. Vielmehr erlaubt die Detailaufnahme der Bohrkerne im Deckgebirge durch Ercosplan und im Residual sowie Zechstein durch die BGR eine zusätzliche Untergliederung der Formationen und Subformationen sowie Konkretisierung der Teufenlage der jeweiligen lithostratigraphischen Grenzen.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 114

Mit nachstehenden tabellarischen Darstellungen werden auf Basis der feldgeologischen Aufnahme in Ergänzung einer detaillierten Bohrkernaufnahme und -begutachtung sowie der, soweit vorhandenen, palynologischen Analysen die abschließenden geologischen Profile in Tabelle 45 und Tabelle 46 festgelegt. Hierbei sind ebenfalls verbliebene Unsicherheiten in der stratigraphischen Einordnung berücksichtigt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 115
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 45: Abschließende lithostratigraphische Gliederung R18 (1.) / Deckgebirge mit Residual und Übergang ins Zechsteinsalinär

Teufe [m]		Periode	Serie	Epoche / Gruppe	Stufe	Formation	Subformation
von	bis						
3,26	117,5	Trias	Untertrias	Buntsandstein	Oberer Bunt-sandstein (s)	Röt (so)	
3,26	34,9						Röt 4 (so4)
34,9	89,5						Röt 3 (so3)
89,5	(108,3)						Röt 2 (so2)
117,5	134,5						
120	129				(Mittlerer und/oder?) Unterer Bunt-sandstein ((sm?-)su)	Undifferenziert	
134,5	397,5				Unterer Bunt-sandstein (su)	undifferenziert	
397,5	405,5	Perm	Oberperm	Zechstein		Fulda (z7)	Bröckelschiefer (z7T)
405,5	418,6					Friesland (z6)	Oberer Friesland-Ton (z6TO)
418,6	427,07						Unterer Friesland-Ton (z6TU)
427,07	427,46					Ohre	Ohre-Anhydrit (z5OA)
427,46	472,94					Residual (R)	(Roter Salzton (z4RT) - Unterer Ohre-Ton (z5TU))
472,94	479,18					Residual –(R) – Aller (z4)	(Roter Salzton (z4RT) - Unterer Ohre-Ton (z5TU)) / Roter Salzton
479,18	489,25					Leine (z3)	Tonmittelsalz (z3TM)

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 116
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 46: Abschließende lithostratigraphische Gliederung R18 (2.) / Zechsteinsalinar

Teufe [m]		Periode	Serie	Epoche / Gruppe	Stufe	Formation	Subformation
von	bis						
0 – 427,46 siehe R18 (1.)							
427,46	488,6	Perm	Oberperm	Zechstein		Residual (R)	(Residualgestein mit Übergang Roter Salztön)
486	490,7					Aller (z4)	Roter Salztön (z4RT)
490,7	518,06					Leine (z3)	Tonmittelsalz (z3TM)
518,06	583,85					Leine (z3)	Schwadensalz (z3SS)
583,85	590,75					Leine (z3)	Tonmittelsalz (z3TM)
590,75	599,93					Aller (z4)	Roter Salztön (z4RT)
599,93	602,52					Aller (z4)	Pegmatitanhydrit (z4PA)
602,52	604,78					Aller (z4)	Basissalz (z4BS)
604,78	731,16					Aller (z4)	Schnee- und Rosensalz (z4SS+z4RS)
731,16	735,75					Aller (z4)	Basissalz (z4BS)
735,75	738,88					Aller (z4)	Pegmatitanhydrit (z4PA)
738,88	759,69					Aller (z4)	Roter Salztön (z4RT)
759,69	781,22					Leine (z3)	Tonmittelsalz (z3TM)
781,22	798,11					Leine (z3)	Schwadensalz (z3SS)
798,11	798,14					Leine (z3)	Anhydritmittel 8 (z3AM8/ah)
798,14	799,87					Leine (z3)	Anhydritmittelsalz 7 (z3AM7/na)
799,87	801,8					Leine (z3)	Anhydritmittel 7 (z3AM7/ah)
801,8	808,01					Leine (z3)	Anhydritmittelsalz 6 (z3AM6/na)
808,01	808,6					Leine (z3)	Anhydritmittel 6 (z3AM6/ah)

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 117

Teufe [m]		Periode	Serie	Epoche / Gruppe	Stufe	Formation	Subformation	
von	bis							
808,6	810,78						Anhydritmittelsalz 5 (z3AM5/na)	
810,78	810,79						Leine (z3)	Anhydritmittel 5 (z3AM5/ah)
810,79	812,72						Leine (z3)	Anhydritmittelsalz 4 (z3AM4/na)
812,72	813,91						Leine (z3)	Anhydritmittel 4 (z3AM4/ah)
813,91	817,43						Leine (z3)	Anhydritmittelsalz 3 (z3AM3/na)
817,43	817,55						Leine (z3)	Anhydritmittel 3 (z3AM3/ah)
817,55	818,57						Leine (z3)	Anhydritmittelsalz 2 (z3AM2/na)
818,57	818,71						Leine (z3)	Anhydritmittel 2 (z3AM2/ah)
818,71	818,81						Leine (z3)	Anhydritmittelsalz 2 (z3AM2/na)
818,81	818,9						Leine (z3)	Anhydritmittel 2 (z3AM2/ah)
818,9	819,16						Leine (z3)	Anhydritmittelsalz 1 (z3AM1/na)
819,16	819,28						Leine (z3)	Anhydritmittel 1 (z3AM1/ah)
819,28	822,28						Leine (z3)	Buntes Salz (z3BT)
822,28	824,43						Leine (z3)	Bändersalz (z3BD)
824,43	828,95						Leine (z3)	Banksalz (z3BK)
828,95	834,58						Leine (z3)	Orangesalz (z3OS)
834,58	900	Leine (z3)	Liniensalz (z3LS)					

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 118

5.2 Strukturgeologische Situation

Für die Beschreibung der strukturgeologischen Situation werden im Wesentlichen die Ergebnisse der Bohrkernbeschreibung und Fotodokumentation sowie insbesondere die Aussage des ABI (unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten) mit den vorliegenden Erkenntnissen der 3D-Seismik und Oberflächenkartierung verknüpft. Im Vordergrund steht hierbei die Ausweisung relevanter tektonischer Elemente wie Störungen sowie auch Hinweise auf stärker geklüftete Bereiche mit einer allgemeinen Erläuterung zum strukturellen Aufbau.

5.2.1 Deckgebirge

Die Erkenntnisse der R18 bestätigten im Wesentlichen das Verständnis des Strukturbildes, welches bereits auf Basis der 3D-Seismik entwickelt wurde. Dennoch konnte die Interpretation im Kontaktbereich zwischen Süd- und Nordflanke durch die neue Aufschlusslage westlich der Bohrungen Remlingen 15 und Remlingen 9 präzisiert werden (Abbildung 26).

Die Bohrung R18 startet an der Oberfläche im höheren Oberen Buntsandstein (Röt; Tabelle 45), an dessen Basis die unteren Abschnitte des Röt 2 sowie die Einheiten vom Rötton bis zum Rötalinar fehlen. Die vorhandenen Rötschichten zeigen ein variables Einfallen mit wechselnden Einfallrichtungen und -winkeln (vgl. ABI/ATV Kapitel 4.3.2), was auf eine kleinräumige Verfaltung der ohnehin tektonisch verstellten geologischen Einheiten hindeutet.

In der Nähe zur Basis der mit der R18 erbohrten Röteinheiten, d. h. am Übergang zu den Gesteinen der Nordflanke, erscheint das Gefüge brekziös und flaserig. Der Kontakt zwischen Süd- und Nordflanke wird hier als Störungszone interpretiert, die sich durch die gegenseitige Überschiebung der Flanken bildete. Die Deformation entlang dieser Störungszone führte zu einer Brekzierung und Verfaltung der Gesteine und vermutlich zu einem tektonischen Abscheren der unteren Rötschichten. Diese sind möglicherweise in einem tieferen Niveau des Kontakts zwischen Süd- und Nordflanke zurückgeblieben. Eine vergleichbare strukturgeologische Situation wurde in der Bohrung Remlingen 9 angetroffen, welche sich ca. 120 m nordwestlich der R18 befindet und in der ebenfalls die Einheiten des Röt 1 und Röt 2 fehlen am Kontakt der Süd- zur Nordflanke fehlen.

Unterhalb des Störungskontakts an der Basis der Südflanke bei ca. 120 m wurden zunächst rötliche Ton- und Sandsteine angetroffen, welche im Zuge der feldgeologischen Ansprache zunächst dem Mittleren Buntsandstein oder Unteren Buntsandstein (Tabelle 45) der Nordflanke zugeordnet wurden. Eine Einstufung in den Mittleren Buntsandstein würde in Diskrepanz zur seismischen Interpretation und zur Oberflächengeologie stehen, in welchen die Basis des Mittleren Buntsandsteins weiter nördlich bzw. in geringen Tiefen verläuft. Ein Vorkommen des Mittleren Buntsandsteins in diesem Niveau der R18 würde bedeuten, dass dieser durch eine Störung mit Versatz von mindestens 100 m oder durch ein engräumiges Abknicken der Schichten deformiert wäre. Auf Grund dieser Unsicherheit über die strukturelle Situation wurde die Einordnung in den Mittleren Buntsandstein und die räumliche Detailmodellierung einer solchen Deformation des Buntsandsteins nicht weiter verfolgt. Der gedankliche Ansatz ist allerdings in der lithostratigraphischen Gliederung erhalten und entsprechend fraglich gekennzeichnet.

Die Messungen des Akustischen Bohrlochscans (ABI) zeigen, dass die Schichten des Unteren Buntsandsteins der Nordflanke bis in eine Tiefe von ca. 255 m ein relativ gleichmäßiges Einfallen bis 50° Richtung N bis NE aufweisen. Somit stoßen diese Schichten in stumpfen Winkel an die Basis der Südflanke (Abbildung 26 (a/b)). Diese Beobachtungen deuten dem aktuellen Strukturverständnis nach auf eine Überschiebung der Süd- auf die Nordflanke hin.

Ab einer Tiefe von ca. 255 m zeigen die ABI Daten, dass sich das Schichteinfallen des Unteren Buntsandstein immer wieder über kurze Distanzen ändert. Zudem ist in den Bohrkernen zu sehen,

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 119

dass bis zur Basis des Unteren Buntsandstein brekziöse und geklüftete mit gut geschichteten intakten Abschnitten wechsellagern. In den 3D-seismischen Daten und in der Oberflächengeologie gibt es zahlreiche Hinweise auf Störungen im Scheitelbereich der Asse Salzstruktur, welche überwiegend als verkippte Abschiebungen gedeutet werden. Unmittelbar im Nahbereich der R18 ist das Reflektorbild der 3D-Seismik allerdings nicht eindeutig interpretierbar und vermutlich von Artefakten überlagert. In den Bereichen weiter nördlich, in welchen das Reflektorbild deutlicher ist, sind allerdings Abschiebungen in den Buntsandsteinschichten der Nordflanke erkennbar. Die Störungspur mindestens eine dieser Abschiebungen verläuft in Richtung der R18 (Abbildung 26) und könnte diese im unteren Bereich des Deckgebirges kreuzen und die dortigen brekzierten Bereiche sowie das variierende Einfallen erklären. Des Weiteren könnte die Subrosion der Zechsteinsalze im darunterliegenden Residualkomplex zu einer Volumenreduktion und damit (im Nahbereich) zu einem Verstürzen und Brekzieren des darüber liegenden Deckgebirges geführt haben.

Ungeachtet der ursächlichen Diskussion konnten diese kleinräumigen Störungen und Änderungen der Lagerungsverhältnisse im geologischen Modell nicht aufgelöst werden. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass die Modelleinheit des Unteren Buntsandstein relativ gleichmäßig mit 50 bis 60° nach N bis NE einfällt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 120

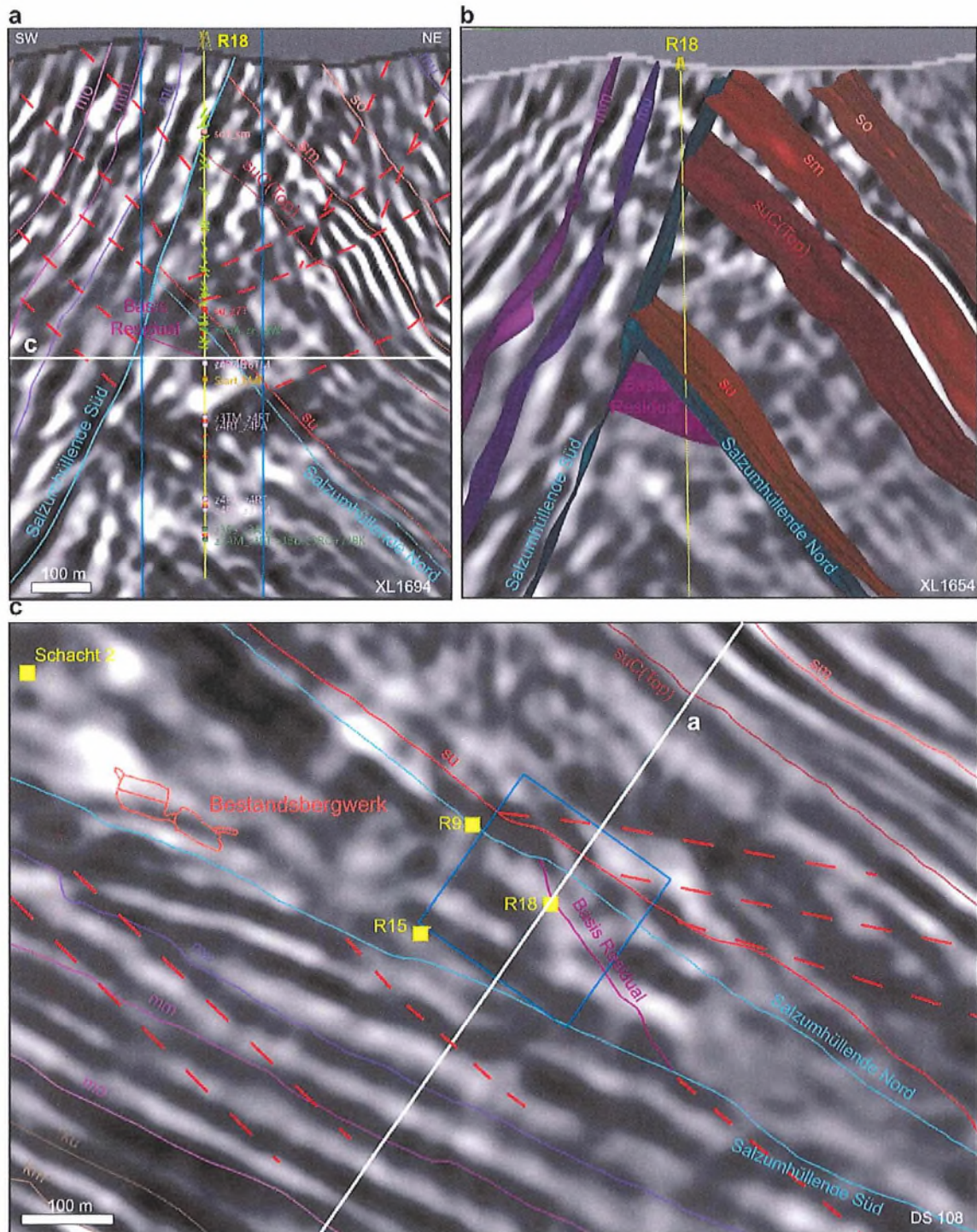


Abbildung 26: Darstellung der modellierten Flächen und Strukturelemente im Deckgebirge und Residualbereich. a: Profilschnitt durch die 3D Seismik (XL 1694) durch die Bohrung R18. Rote, gestrichelte Linien deuten vermutete Störungen an. Die grünen Striche an der Bohrspur sind Einfallswerte der Schichtung interpretiert auf Basis der ABI-Messungen. b: Perspektivansicht auf die Deckgebirgsschichten. Mit Ausnahme der Calvörde Fm. sind jeweils die Basisflächen dargestellt. c: Tiefenschnitt durch die 3D Seismik (490 m).

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 121

5.2.2 Residualbereich

Der konkordante Übergang vom Unteren Buntsandstein in die oberen Zechsteinschichten (ab Bröckelschiefer) zeichnet sich durch ein relativ gleichmäßiges, < 45° steiles Schichteinfallen nach NE bis E aus, was für eine ungestörte Abfolge spricht. Etwa mit Beginn der Friesland-Formation (ca. 410 m) bis zu Basis des Residualgesteins wird das Schichteinfallen unregelmäßiger und nur noch vereinzelt erkennbar. Das Gefüge der plastisch deformierten Tonsteine in diesem Abschnitt ist teils stark brekziös oder massig. Ab einer Tiefe von 425 m treten stellenweise brekziierte Anhydritpartien auf, welche als Überreste des Ohre- und des Grenzanhydrits gedeutet werden. Daher ist davon auszugehen, dass sich an der Basis des Unteren Buntsandsteins die stratigraphische Normalabfolge des jüngeren Zechsteins anschließt, welche allerdings stark durch Subrosion und plastische Deformation überprägt wurde. Vor dem Antreffen von Steinsalz-führenden Gesteinen treten rote und graue Tonsteine auf, welche dem Roten Salzton mindestens aber in residualer Form zugeordnet werden. Der Farbwechsel zeigt eine subvertikale Lagerung und am Übergang zum Steinsalz folgt die Einheit des Tonmittelsalzes der Leine-Formation. Dies bedeutet, dass die Salzgesteine der Aller-Formation (Primärmächtigkeit: ca. 28 m) im Bereich des Residualbereichs weggelöst wurden. Auf Grund der gestörten Lagerungsverhältnisse im Residualkomplex kann das Top des Roten Salztons und der Übergang zu jüngeren Tonsteinen und Anhydriten des Zechsteins nicht genau lokalisiert werden. Es ist aber davon auszugehen, dass sich auch der Rote Salzton innerhalb des Residualkomplexes wieder in eine flache Lagerung und parallel zur Basis des Unteren Buntsandstein einregelt (Abbildung 27 (a)).

5.2.3 Salinar

Unterhalb des Residualbereichs einschließlich des darin bereits vorhandenen Roten Salztons wurde zunächst das steil stehende Tonmittelsalz durchteuft. Bedingt durch die steile Lagerung der Schichten erfolgt der Durchgang von Rotem Salzton zu Tonmittelsalz in der R18 (2.) ca. 10 m tiefer als in der R18 (1.). Nach einem Bereich aus Steinsalz-Formationen der Leine-Folge wird erneut der Rote Salzton bei ca. 590 m Teufe in überkippter Lagerung angetroffen (Abbildung 27). Darunter folgt ein Bereich aus Salzgesteinen der Aller-Folge, bevor wiederum Roter Salzton erbohrt wurde. Dann folgen das Tonmittel- und das Schwadensalz und darunter bereits das Anhydritmittelsalz, welches hier mit ca. 21 m in reduzierter Mächtigkeit vorliegt.

EMR-Reflektoren und Auswertungen der ABI-Daten geben Hinweise auf den Schichtverlauf, vor allem des Roten Salztons (Abbildung 27 (a)). Demnach sind die Schichten der Leine- und Aller-Folge ausgehend vom Residual zunächst in eine nach Norden geschlossene Flexur gelegt (Abbildung 27 (b)). Tiefer schließt sich dann eine breite und weitreichende Synklinale an (Abbildung 27). In diesem Bereich ist der Rote Salzton, von der R18 ausgehend, bis zu 80 m nach Süden eingefaltet und die Steinsalzpartien der Aller-Folge sind auf über 200 m Mächtigkeit (gemessen von der Basis Grenzanhydrit an der Nordflanke) angestaut. Die restlichen Schichten der Leine-Folge, inklusive des Anhydritmittelsalzes, sind in gleicher Weise eingefaltet, sodass sich der Abstand vom Anhydritmittelsalz zur südlichen Salzumhüllenden auf weniger als 100 m verringert und somit eine starke Einengung widerspiegelt.

In der Tiefbohrung Remlingen 9 wurde das Anhydritmittelsalz bei einer Teufe von 1002 m angetroffen und damit rund 200 m tiefer. Dies bedeutet, dass das Anhydritmittelsalz in Richtung NW und N eine weitere, noch tiefere Synklinale ausbildet (Abbildung 27 (c)). Im Bereich der R18 deutet das relativ flache Schichteinfallen des Anhydritmittelsalz darauf hin, dass sich hier der Scheitel einer Antiklinale befindet (Abbildung 27 (b)). Im Profilschnitt (XL 1694) führt dies zum Erscheinungsbild einer w-förmigen Verfallung der Schichten der Leine- und Aller-Folge. Im Tiefenschnitt ist erkennbar, dass die nordöstliche Synklinale (Abbildung 27 (c)) ein E-W bis ENE-WSW Steichen aufweist

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 122

(„Quermulde“) und damit diagonal zum generellen Asse-Streichen (NW-SE) sowie zum Streichen benachbarter Falten in der Umgebung der R18 steht.

Wie aus der 3D-Seismik ersichtlich ist, biegen die Schichten der Leine- und Aller-Folge in Richtung NW und SE wieder auf den Nordflanken-parallelen Verlauf zurück, welcher auch im Bereich des Bestandsbergwerks vorherrscht. Sowohl in diesem Bereich als auch südöstlich der R18 wird hier das Volumen in der Salzstruktur durch breite Sattelstrukturen der Staßfurt-Formationen aufgefüllt.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 123

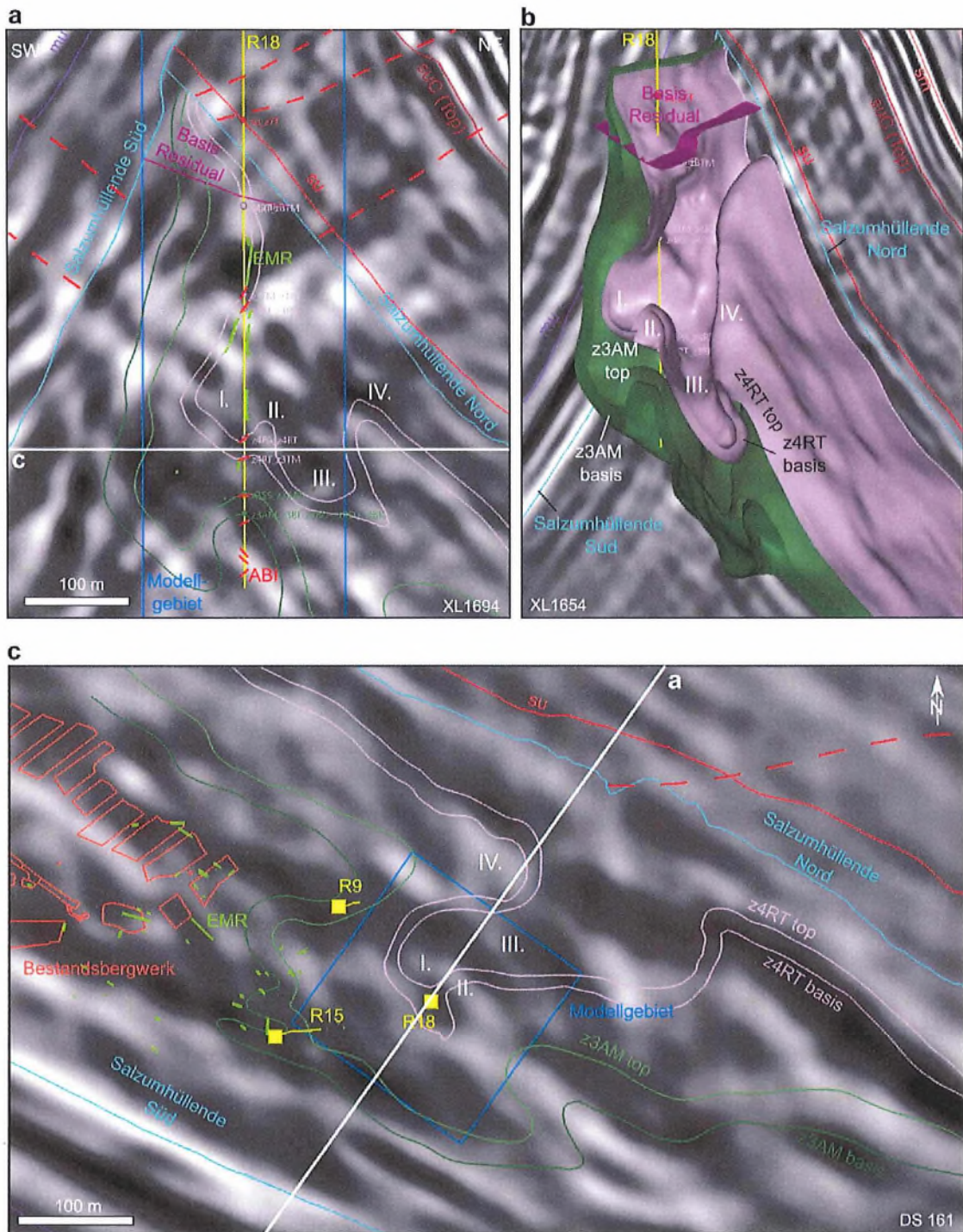


Abbildung 27: Darstellung der modellierten Fläche des Intrasalinars: Roter Salzton (z4RT) und Anhydritmittelsalze (z3AM), jeweils Top und Basis. a: Profilschnitt durch die 3D Seismik im Bereich der R18. Die roten Striche entlang der Bohrspur zeigen das Schichteinfallen basierend auf ABI Daten. b: Perspektivansicht aus NE. c: Tiefenschnitt durch die 3D Seismik im Bereich des geplanten Rückholbergwerks (750 m unter GOK). Das blaue Quadrat zeigt das Detailmodellgebiet für die konkrete Schachtplanung. Gestrichelte, rote Linien deuten vermutete Störungen an.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 124
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

5.3 Hydrogeologische Situation

Die nachfolgende integrative Auswertung der Erkundungsbohrung R18 erfolgt im Kontext hydrogeologischer Fragestellungen und Aspekte. Berücksichtigung finden hierbei insbesondere die im Zusammenhang mit der R18 durchgeführten geophysikalischen Bohrlochmessungen, die hydrogeologischen und geohydraulischen Untersuchungen und die hydrochemischen Analysen. An geeigneter Stelle werden ergänzend die Ergebnisse bereits früher durchgeführter Erkundungsbohrungen und die Daten der Grundwassermessstellen des Messnetzes Asse herangezogen. Die Auswertung bezieht sich explizit auf das aufgeschlossene Deckgebirge und fokussiert dementsprechend auf die R18 (1.). Sämtliche Messdaten der R18 (2.) beginnen erst bei einer Tiefe von ~ 515 m und somit im Salinar und werden daher bei diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt.

5.3.1 Hydrostratigraphische Gliederung

Unter Berücksichtigung der geophysikalischen Bohrlochmessungen in der Erkundungsbohrung R18 und integrativen Auswertung selbiger sind Aussagen zur hydrostratigraphischen Gliederung der erbohrten Schichtenfolgen möglich. Die Auswertung berücksichtigt die GR-, NMR-, DIL-, Dichte- und ATV-Messungen sowie das SAL/TEMP-Log und die Daten der Spülungsverluste, Druckspiegelmessungen und der Bohrkernaufnahme. An geeigneter Stelle werden Abgleiche mit umliegenden Erkundungsbohrungen und -maßnahmen berücksichtigt. Hieraus lassen sich Aussagen zu geologischen und textuellen Ausprägungen der Gesteine, zur Lösungssättigung, zur Gesteinsporosität, zu potenziellen Zu- und Abflusszonen und zur Salinität der Lösungen – und damit insgesamt zur hydrostratigraphischen Untergliederung der durchörterten Schichtenfolgen treffen.

Die aus den genannten Messungen und Beobachtungen abgeleitete hydrostratigraphische Gliederung ist in der nachfolgenden Tabelle 47 dargestellt. Die Einordnung der hydraulischen Durchlässigkeit folgt der Ad-hoc Arbeitsgruppe Hydrogeologie [52].

Tabelle 47: Hydrostratigraphische Gliederung nach [52] der durch die Erkundungsbohrung R18 aufgeschlossenen Formationen im Deckgebirge; alle Teufenangaben beziehen sich auf Messungen in der R18 (1.).

Teufenbereich [m]	Stratigraphische Einordnung	Hydrostratigraphische Beschreibung	
0 – 20	Oberer Buntsandstein (Röt 4)	Für den oberflächennahen Bereich liegen weniger Informationen vor, da die geophysikalischen Bohrlochmessungen erst bei 16 m einsetzen. Auf Basis der geologischen Aufnahme des Bohrplatzes (vgl. Kapitel 4.1) ist hier von einer oberflächennah aufgelockerten Zone auszugehen.	Oberflächen-nahe Auflockerung vermutlich in Verbindung mit nicht quantifizierbarer Durchlässigkeit
20 – 25	(Oberer Buntsandstein (Röt 4))	Die im ersten Bohrlochabschnitt festgestellten Spülungsverluste von 388,8 m ³ sind vornehmlich anhand der Kaliber und ATV-Messung in diesem Bereich zu verorten. So wurden in diesem Teufenab-	Karstbereich mit entsprechenden Hin-

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 125
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Teufenbereich [m]	Stratigraphische Einordnung	Hydrostratigraphische Beschreibung	
		<p>schnitt diverse offene Klüfte erkannt, die stellenweise zu größeren Ausbrüchen vom Sollkaliber führen wie bspw. im Teufenbereich 23,0 – 24,8 m. Maximal wird dabei der doppelte Solldurchmesser erreicht. Aufgrund der Spülungsfüllung in diesem Bereich sind die übrigen geophysikalischen Messungen nur bedingt aussagekräftig. So zeigen Dichte, DIL und NMR in diesem Bereich hauptsächlich den spülungsgefüllten Ausbruch an. Die daraus abgeleitete Gesamtporosität ist hier stark fehlerbehaftet und nicht vertrauenswürdig. Auch die kleineren Kaliberrauigkeiten passen gut mit offenen Klüften aus der ATV-Messung zusammen. Der Spülungsverlust über diese kleinen und größeren Klüfte/Ausbrüche ist sehr wahrscheinlich. Da nach dem Rückzementieren der Kernbohrung bei der Erweiterungsbohrung nur noch geringfügige Spülungsverluste bis zu einer Teufe von ca. 40 m aufgetreten sind, ist davon auszugehen, dass es sich hier um einen verkarsteten Bereich angrenzend an die oberflächennah aufgelockerte Zone handelt. Vergleichbare Karsterscheinungen wurden im Rahmen der erweiterten Baugrunderkundung im Umfeld der R18 mehrfach identifiziert.</p>	weisen auf erhöhte Durchlässigkeit
25 – 115	Oberer Buntsandstein	<p>Dieser Abschnitt ist lithologisch unterteilbar in zwei Bereiche: Derjenige zwischen 25 – 90 m ist durch überwiegend graue und rotbraune Tonsteine des Röts mit Einschaltungen von Anhydritlagen charakterisiert. Das GR- und SGR-Log registrieren zwischen 25 – 90 m typische Werte von ca. 60 – 100 API. Zwischen 90 – 115 m überwiegen sulfathaltige Schichten. Dies ist insbesondere auch durch das deutlich niedrigere GR-Log (20 – 80 API) und einen Anstieg des Formationswiderstands auf >100 Ωm gekennzeichnet.</p> <p>Im Bohrlochbild und der Bohrkernaufnahme identifizierte Klüfte sind in der Regel mit sekundären Ausfällungen verheilt. Die NMR-Messung ist für den gesamten Bereich gleichmäßig und zeigt wenig Anteile an kapillar gebundenem und freiem Wasser.</p> <p>Für den hydraulischen Packertest im Intervall R18 i1 (54 – 85 m) ergibt sich ein als repräsentativ eingeschätzter k_f-Wert von $4,50 \cdot 10^{-12}$ m/s. Hieraus ergibt</p>	Äußerst geringe Durchlässigkeit

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 126
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Teufenbereich [m]	Stratigraphische Einordnung	Hydrostratigraphische Beschreibung	
		<p>sich für den Abschnitt eine äußerst geringe hydraulische Durchlässigkeit. Dies ist auf dem Asse-Höhenzug typisch für die Tonsteine des Oberen Buntsandsteins.</p>	
115 – 135	Störungszone, Unterer Buntsandstein	<p>Der Abschnitt zwischen 115 – 135 m besteht überwiegend aus Tonsteinen, in einigen Bereichen mit sulfatverheilten Klüften. Teils ist der Tonstein mit mäßig verfestigten Sandsteineinschaltungen durchzogen. Aufgrund der lithostratigraphischen Beschreibung und der nachfolgenden Charakterisierung lässt sich dieser Abschnitt als Überganszone / Störungszone zwischen Süd- und Nordflanke einordnen (siehe Kapitel 5.2.1).</p> <p>Das NMR-Log zeigt für diesen Abschnitt – im Gegensatz zu dem vorherigen und dem nachfolgenden Abschnitt – einen höheren Anteil an freiem Wasser in Kombination mit einer erhöhten Gesamtporosität von 10 – 20 %. Auch in diesem Bereich wurden Kaliberausbrüche detektiert, sodass die Gesamtporosität leicht überschätzt ist. Lediglich der Bereich zwischen 125,0 – 130,0 m zeigt keine Kaliberausbrüche, sodass für diesen Teufenbereich die Gesamtporosität unter den Restriktionen aus Kapitel 4.3.2 entsprechend dem DMT-Bericht [13] angenommen werden kann.</p> <p>Aus dem Bohrlochbild und der Bohrkernaufnahme lassen sich nur wenig konkrete Störungen und Schichtflächen identifizieren. Der Formationswiderstand nimmt in diesem Bereich wieder auf Werte um ~10 Ωm ab. Ebenso nimmt das Dichte-Log in diesem Teufenabschnitt erkennbar ab, was auf die eingeschalteten Sandsteinlagen zurückzuführen ist. Die GR-Kurve schwankt aufgrund der unterschiedlichen lithologischen Eigenschaften der einzelnen Schichtelemente zwischen 80 und 160 API.</p> <p>Alle aufgezeichneten geophysikalischen Messverfahren deuten in diesem Teufenbereich einen Wechsel der lithologischen Eigenschaften und damit die Überganszone zwischen Oberen -und Un-</p>	
		<p>Äußerst gering durchlässig</p>	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 127
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Teufenbereich [m]	Stratigraphische Einordnung	Hydrostratigraphische Beschreibung	
		<p>terem Buntsandstein in Verbindung mit dem Übertritt der Bohrspur von der Süd- auf die Nordflanke an.</p> <p>Der gesamte Abschnitt wurde durch den hydraulischen Packertest R18 i3 (vgl. Kapitel 4.4) erfasst. Der als repräsentativ eingeschätzte k_f-Wert von $1,70 \cdot 10^{-10}$ m/s zeigt ergänzend zu den wenigen identifizierten Störungen, dass dieser Bereich, obwohl er als Übergang zwischen der Süd- und Nordflanke identifiziert wurde, hydraulisch äußerst gering durchlässig ist. Auch die Sandsteineinschaltungen scheinen hier nicht zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit zu führen.</p>	
135 – 165	Unterer Buntsandstein	<p>Der Abschnitt umfasst geschichtete Tonsteine mit Sandstein-Zwischenlagen sowie oolithischen Sandsteinen („Rogenstein“) des Unteren Buntsandsteins.</p> <p>Der gesamte Abschnitt zeigt eine geringe Gesamtporosität von ca. 5 – 10 %. Nur ein Bereich (163 - 165 m) weist eine Gesamtporosität von ~ 20 % auf. Im gleichen Bereich fällt die Dichte auf $2,3 \text{ g/cm}^3$, bei gleichbleibendem GR. Im übrigen Abschnitt zeigen GR- und Dichte-Log ein negativ korrelierendes Verhalten, wobei die Dichte wieder durchschnittliche Werte zwischen $2,35 - 2,65 \text{ g/cm}^3$ anzeigt. Zum einen verdeutlichen die Schwankungen im Dichte- und GR-Log (GR-Log mit schwankenden Werten zwischen 60 – 180 API) die Wechsellagerung zwischen Tonstein und (oolithischem) Sandstein. Ein Test der oolithischen Sandsteine hat gezeigt, dass die Matrix nicht kalzithaltig ist.</p> <p>Aus dem Bohrlochbild und der Kernaufnahme wurden einige schichtparallele Klüfte, teilweise mit erkennbarem Versatz, aber meistens geschlossen/verheilt identifiziert. Die SAL/TEMP-Messungen haben hier keine Zu-/Abflusszone gezeigt und es sind auch keine nachweisbaren Spülungsverluste aufgetreten. Der Packertest im Intervall i2 (149,00 – 171,18 m) umfasst vor allem die oolithischen Sandsteine im unteren Abschnitt. Für das Testintervall ergibt sich ein als repräsentativ eingeschätzter k_f-Wert von $2,3 \cdot 10^{-8}$ m/s. Vergleichbare Werte für den</p>	Sehr gering durchlässig

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 128
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Teufenbereich [m]	Stratigraphische Einordnung	Hydrostratigraphische Beschreibung	
		<p>Rogenstein in einer ähnlichen Tiefenlage liegen bisher nicht vor. Ermittelte Werte aus Bereichen mit geringem Abstand zur Geländeoberkante zeigen einen bis zu zwei Größenordnungen höheren k_f-Wert. Der Rogenstein ist daher in dieser Tiefenlage in der R18 als sehr gering durchlässig zu charakterisieren.</p> <p>Grundwassermessstellen des hydrogeologischen Monitorings der Asse, welche in einer vergleichbaren lithologischen Formation verfiltert sind, aus welcher die Probe im Intervall i2 gewonnen wurde, sind rar. Einzig die GW-003 ist im Unteren Buntsandstein (so1 – so4) verfiltert [53]. Die Wasseranalyse der Probe aus dem Intervall i2 zeigt im Wesentlichen eine deutlich höhere Mineralisierung der Hauptkomponenten, insbesondere Natrium (Faktor 50) und Sulfat (Faktor 60) als die Analysedaten der Grundwasserproben aus der GW-003. Da die Bohrspülung im Intervall i2 der R18 noch nicht aufgesalzen war, kann diese hier nicht ursächlich für die deutlich höhere Mineralisierung in der GW-003 sein.</p>	
165 – 422	Unterer Buntsandstein, ab 397 m Fulda-/Friesland-Fm.	<p>Der Abschnitt umfasst dunkelrotbraun, teilweise auch grünlichgraue, feste bis harte Tonsteine sowie Einschaltungen von Sand- bzw. Kalksandsteinen, die überwiegend dem Unteren Buntsandstein zugeordnet werden können.</p> <p>Der große Abschnitt des Unteren Buntsandsteins ist gekennzeichnet durch weitestgehend konstante Werte des GR-Logs (zwischen 100 – 140 API), was auf Tonstein mit geringen Anteilen an Störeinflüssen hindeutet. Die Messung des elektrischen Widerstands zeigt von 165 – ca. 345 m Werte von ca. 10 Ωm an. Ab etwa 345 m (nach dem nachfolgend beschriebenen Klufbereich mit einem potentiellen Austausch zwischen Bohrspülung und Grundwasser) nimmt der elektrische Widerstand bis 422 m auf etwa 1 Ωm ab. Diese Abnahme, in Kombination mit einer annähernd gleichbleibenden Gesamtporosität spiegelt die Zunahme der spez. el. Leitfähigkeit der Formationswässer wieder, was auch durch die Ergebnisse der gewonnenen Grundwasserproben bestätigt wird (R18 i5b zwischen 365,90 und</p>	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 129
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Teufenbereich [m]	Stratigraphische Einordnung	Hydrostratigraphische Beschreibung	
		<p>390,99 m: 53,6 mS/cm; R18 i4 zwischen 450,70 – 483,00 m: ~ 236 mS/cm).</p> <p>Aus hydrogeologischer Sicht repräsentieren die Messergebnisse in diesem Bereich die kompakten, sehr gering durchlässigen Tonsteine des Unteren Buntsandsteins und hier ebenso des Bröckelschiefer (z7T) des Zechsteins.</p> <p>Ausnahmen innerhalb dieses Abschnittes bilden vermehrte Klüfte im Bereich ~ 330 – 347 m, welche nachfolgend beschrieben sind.</p>	
Klüfte ~ 330 – 347	330,5	<p>Im hier genauer betrachteten Teufenbereich fallen zunächst die Kaliberausbrüche auf, die sich meist beim Bohren in geklüfteten Bereichen ergeben. Die lokalen Dichteabnahmen und gleichzeitigen Widerstandzunahmen sind vornehmlich auf diese Ausbrüche zurückzuführen. Ebenso misst das NMR-Log hier fälschlicherweise eine erhöhte Gesamtporosität sowie erhöhten Anteile an freiem Fluid. Das Bohrlochbild des ATV zeigt zwischen 330 m und 347 m mehrere unterschiedlich mächtig ausgeprägte offene Klüfte welche einen Frischwassereintrag in das Bohrloch ermöglichen könnten. Dieser Frischwassereintrag wird vornehmlich durch die spezifische elektrische Leitfähigkeit der Bohrspülung erkannt, welche innerhalb von ca. 30 m (315,0 – 345,0 m) von ca. 180 mS/cm auf 100 mS/cm abfällt. Der wahrscheinlichste Zuflussbereich liegt in einer Teufe von ca. 344,7 m. In dieser Teufe zeigen die nahe und mittlere Widerstandskurve eine Zunahme des Widerstandes an, zudem wird im NMR-Log ein erhöhter Anteil an freiem Fluid registriert und nach ATV befindet sich dort eine offene Kluft, welche möglicherweise als Wasserleiter angenommen werden kann.</p> <p>Dies spricht hier für einen stark geklüfteten Bereich (~ 329 – 347 m) für den eine ausreichende hydraulische Durchlässigkeit vorliegt, um einen Austausch von Grundwasser (geringer mineralisiert als die Bohrspülung) mit der Bohrspülung zu ermöglichen. Der Bereich zwischen Bereich ~ 330 – 347 m lässt</p>	
	333,0		
	344,5		
	346,5		
		Hinweise auf Kluftdurchlässigkeit	

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 130
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Teufenbereich [m]	Stratigraphische Einordnung	Hydrostratigraphische Beschreibung		
		sich daher als Zu- bzw. Abflusszone charakterisieren.		
422 – 460	Friesland- und Ohre-Fm. bis 427,5 m Ab 427,5 m Residual	<p>Der Abschnitt oberhalb des Zechsteinsalinars umfasst massige, dunkelrotbraune Tonsteine, zur Basis hin deutlich entfestigt. Vereinzelt sind Bereiche mit Sulfateinschlüssen, sowie offenen Porenräumen (bis ~ 5 cm) vorhanden.</p> <p>Das Bohrlochbild bestätigt hier die Erfassung und Beschreibung der Bohrkerne. Während in den vorherigen Abschnitten wiederkehrende Einfall- und Streichrichtungen der Schichten und Klüfte vorhanden waren, ist dieser Abschnitt unregelmäßig und zeigt keine Vorzugsrichtungen.</p> <p>Bis 460,0 m schwankt die Gesamtporosität zwischen 10 – 20 % wobei lokal auch bis zu 30 % erreicht wurden. Dabei wurden keine bedeutenden Anteile an freiem Fluid registriert. Das Kaliberlog ist in diesem Abschnitt grundsätzlich maßhaltig, einzig zwischen 455 – 460 m zeigt sich die Bohrlochkontur rau mit lokalen Aufweitungen von bis zu 0,04 m.</p> <p>Die geophysikalischen Messungen verdeutlichen hier den Übergang vom Zechstein (Friesland-Ton) ins Residual bei ~ 427,5 m. In diesem Abschnitt scheinen die Tonsteine und Tone zur Basis hin zum Teil schon entfestigt zu sein, aus hydrogeologischer Sicht ist das Residual bis 460 m allerdings weiterhin als weitestgehend hydraulisch sehr gering bis äußerst gering durchlässig zu charakterisieren.</p>		undurchlässig
460 – 479,6 (R18 (1.))	Residual	<p>Der Abschnitt oberhalb des Zechsteinsalinars umfasst massige, entfestigte, dunkelrotbraune Tone, zur Basis hin deutlich entfestigt. Vereinzelt sind Bereiche mit offenen Porenräumen (bis ~ 5 cm) vorhanden.</p> <p>Das Bohrlochbild setzt sich hier wie im Abschnitt zuvor fort. Dieser Abschnitt erscheint unregelmäßig und zeigt keine Vorzugsrichtungen.</p> <p>Ab 460,0 m sind im Vergleich mit dem vorherigen Abschnitt geringere Gesamtporositäten detektiert</p>		Mindestens gering durchlässig (ggf. auch höhere Durchlässigkeiten)

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 131
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Teufenbereich [m]	Stratigraphische Einordnung	Hydrostratigraphische Beschreibung
		<p>worben. Unterhalb von 465,5 m können die Ergebnisse des NMR-Log jedoch nicht für eine gesicherte Gebirgsbewertung hinzugezogen werden, da aufgrund von Kaliberausbrüchen vornehmlich die Bohrspülung registriert wurde. Aufgrund von Amplitudenverlusten, infolge von zu großem Bohrlochkaliber (Ausbrüche) können prägnante Klüfte oder Störungen nach dem Bohrlochbild hier nicht identifiziert werden. Die im Kaliber registrierten Ausbrüche in Kombination mit den Amplitudenverlusten im ATV belegen diesen Gebirgsbereich als stark geschädigt. Die Spülungsverluste lassen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf diesen Bereich zurückführen. Die Verlustzone erstreckt sich somit vermutlich auf den Bereich zwischen 459,5 – 479,3 m (vgl. Kapitel 4.9).</p> <p>Der durchgeführte hydraulische Packertest im Intervall R18 i4 liefert einen Best-Fit-Wert für k_f mit $2,50 \cdot 10^{-7}$ m/s. Dies entspricht gemäß der hydrogeologischen Kartieranleitung [52] einem gering durchlässigen Grundwassergeringleiter. Zu berücksichtigen ist hier allerdings, dass dieses Ergebnis durch die verpressten Verlustpillen in dem Bereich der Spülungsverluste beeinflusst ist, sodass die Durchlässigkeit hier durchaus höher sein kann. Hierfür sprechen ebenso die verzeichneten Spülungsverluste von in Summe ca. 1.300 m³.</p>

5.3.2 Grundwasseralter

Auf Basis der gewonnenen und analysierten Grundwasserproben lassen sich Rückschlüsse auf das Alter des Grundwassers ziehen.

Insgesamt liegen die Werte der Deuterium- und Sauerstoffisotope der beiden Wasserproben aus dem Testintervall i2 und i5b in der R18 im Bereich moderner, d.h. postglazial gebildeter meteorischer Wässer. Dementsprechend sind die beprobten Grundwässer jünger als ca. 8.000 – 10.000 Jahre, was als Obergrenze für die Verweilzeit eingeschätzt wird.

Die sehr geringen Tritium- und verhältnismäßig hohen ⁴He_{rad}-Konzentrationen in den GW-Proben sprechen für eine geringe Zumischung von rezentem Grundwasser/Bohrspülung und für eine Verweilzeit in der Größenordnung von mehreren tausend Jahren. Ein signifikanter Anteil von Mantel-Helium lässt sich hier ausschließen. Der geringe Anteil an Bohrspülung in den GW-Proben wird

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 132

durch die Auswertung des Na-Fluoresceins (Uranin) in den Proben (vgl. Kapitel 0) unterstützt. Eine weitere Konkretisierung auf Basis der Radiocarbon-Datierung ist noch ausstehend.

5.3.3 Hydraulisch Durchlässige Struktur im Residual

Auf dem Asse-Höhenzug wurden bereits in der Vergangenheit mehrere Erkenntnisse zu hydraulisch durchlässigen Bereichen oberhalb des Salzspiegels gewonnen. Im westlichen Abschnitt des Asse-Höhenzugs (im Weitesten zwischen Schacht Asse 1 und Groß Denkte) wurden im Rahmen des Ausbaus des hydrogeologischen Messnetzes und der anschließenden Messungen in den 1970er und 1980er Jahren sowie nachfolgender Untersuchungen Subrosionsgerinne an der Basis des Residuals identifiziert, deren Entstehung im Kontext der Gipshutgenese interpretiert wurde [54], [55]. Diesen Subrosionsgerinnen wurden im Vergleich zu den Deckgebirgsformationen höhere hydraulische Durchlässigkeiten zugewiesen und insbesondere ein Grundwasserstrom in Richtung Westen (zu den Salzquellen bei Groß Denkte) nachgewiesen.

Aufgrund der, abgesehen der Ergebnisse der Erkundungsbohrungen Remlingen 9 und Remlingen 15, geringen Informationslage ist man bisher davon ausgegangen, dass in Richtung Osten keine Subrosionsgerinne ausgeprägt sind [55].

Tatsächlich zeigen die Erkundungsbohrungen Remlingen 9 und Remlingen 15 im Bereich des Salzspiegels / Residuals keine Hinweise auf eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit. Insbesondere das Schichtenverzeichnis der Remlingen 9 weist einen konkordanten Übergang aus dem Deckgebirge ins Zechsteinsalinar aus. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der 3D-Seismik fällt jedoch auf, dass diese beiden Bohrungen bereits im Übergang zu den Flanken der Salzstruktur abgeteuft wurden, dort aus dem Deckgebirge ins Zechsteinsalinar übergehen und den zentralen Bereich des Salzspiegels nicht erfassen.

Ergänzend zeigt die Erkundungsbohrung Remlingen 10 oberhalb des Salzspiegels einen Bereich mit erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten und Spülungsverlusten in einer Größenordnung mehrerer 100 m³. Dort ist die Zuordnung des Verlustbereichs zum Residual allerdings nicht möglich, da der Abstand zum Residual mehrere 10er Meter beträgt und der Verlustbereich durch Störungsbahnen beeinflusst zu sein scheint.

Bei der Erkundungsbohrung R18 lässt sich der Verlustbereich mit der erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit dem unteren Abschnitt des Residuals zuweisen. Hier zeigt sich (ähnlich wie bei den Subrosionsgerinnen im Westen der Asse-Struktur) eine Gliederung des Residuals in einen oberen, wenig durchlässigen Abschnitt und einen unteren, dem Zechsteinsalinar direkt aufliegenden höher durchlässigen Abschnitt. Die Genese dieses höher durchlässigen Abschnitts ist bei der R18 auf Basis der vorliegenden Ergebnisse allerdings nicht einer Gipshutgenese zuzuordnen und entspricht nicht den bisher beschriebenen Subrosionsgerinnen im Westen des Asse-Höhenzugs. Die Ergebnisse der 3D-Seismik sowie der geophysikalischen Messungen im Bohrloch der R18 belegen einen steil aufgestellten Verlauf der Schichtfolgen des Zechsteins unterhalb des Residuals. Auch wenn eine stratigraphische Einordnung des Residuals hier schwierig ist, liegt die Vermutung nahe, dass das Residual aus diesen steil aufgestellten Zechsteinfolgen gebildet wird. Im direkten Umfeld der R18 sind dies die Schichtfolgen des Roten Salztons und des Tonmittelsalzes.

Hieraus ergeben sich verschiedene Schlussfolgerungen:

- Im Umfeld der R18 ist der höher durchlässige, untere Abschnitt im Residual stark an die ursprünglich steil aufgestellten Schichten des Zechsteins (hier vermutlich der Rote Salzton) gebunden, welche parallel zum Streichen des Asse-Höhenzugs verlaufen. Dies erklärt auch

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 133

die unterschiedlichen lithologischen und hydrogeologischen Charakterisierungen des Übergangs aus dem Deckgebirge ins Zechsteinsalinar in den Erkundungsbohrungen Remlingen 9 und Remlingen 15, welche nicht im zentralen Bereich des Salztops abgeteuft wurden.

- Insbesondere quer zum Streichen der Asse-Struktur können sich somit deutliche Unterschiede der hydraulischen Durchlässigkeit des Residuals am Salzspiegel ergeben. Die räumliche Ausdehnung dieser höher durchlässigen Bereiche im Residual scheint quer zum Streichen eher begrenzt zu sein, wohingegen eine Ausdehnung parallel zum Streichen erwartbar ist.
- Die konkrete Ausdehnung der höher durchlässigen Bereiche im Residual lassen sich auf Basis der Ergebnisse der Erkundungsbohrung R18 nicht weiter konkretisieren. Insbesondere die Vernetzung mit weiteren hydraulisch durchlässigen Bereichen im Residual (nicht im Kontext des Roten Salztons) quer zum Streichen, sowie parallel zum Streichen bis in Bereiche bereits identifizierter höherer hydraulischer Durchlässigkeiten kann auf der bestehenden Datengrundlage nicht abschließend beurteilt werden.
- Konkrete Erörterungen und Bewertungen potentieller Fließpfade am Residual sind auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis und Erkenntnisse nicht final belastbar.

5.4 Gebirgsmechanische Situation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der geotechnischen Bohrlochtests zusammengefasst und einzelne zur Einordnung den Ergebnissen der weiteren Bohrlochmessungen und der feldgeologischen Aufnahme gegenübergestellt. Die Betrachtungen fokussieren im Wesentlichen auf das Verformungsverhalten und eine Zusammenfassung der für die verschiedenen Gebirgsbereiche ermittelten Spannungsverhältnisse und -richtungen.

5.4.1 Verformungsverhalten

Die Steinsalzbereiche im Zechsteinsalinar lassen sich für die getesteten Gebirgsbereiche auf Grundlage der Ergebnisse der Dilatometertests als wenig verformbar einstufen (vgl. 4.6.2, Tabelle 29). Lediglich drei Tests weisen moderate Verformbarkeit aus, wobei zwei dieser Testergebnisse vermutlich im Wesentlichen durch die lithologische Ausprägung des Roten Salztons bestimmt werden.

Für die Einheiten des Deckgebirges einschließlich des Residualbereichs bzw. vielmehr für unterschiedliche Teufenbereiche innerhalb des Deckgebirges werden variierende Verformbarkeitseigenschaften über die gesamte Bandbreite (wenig bis sehr stark verformbar) festgestellt (vgl. 4.6.2, Tabelle 29). Einzelne dieser Bereiche spiegeln ebenfalls die Beobachtungen aus den bohrlochseismischen Messungen wider (vgl. 4.3.4, Tabelle 17), wonach die sich aus den seismischen Geschwindigkeiten berechnete Poissonzahl bzw. das v_p/v_s -Verhältnis im Deckgebirge einige Anomaliezonen mit hohen Werten ausweist (siehe Tabelle 48), die deutlich von den vorherrschenden Poissonzahlen um 0,18 abweichen [56]. Nach [57] können entsprechend hohe Werte in den betreffenden Gebirgsbereichen mit fluidgefüllten Kluffnetzwerken oder mylonisierte Scherzonen in Verbindung gebracht werden.

Die hohen Werte der Poissonzahl zwischen 390 – 460 m MD sind im Residual erwartbar.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 134
NAAN	NNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 48: Gegenüberstellung der Verformbarkeit gem. Dilatometertests und anhand der Bohrlochseismik identifizierter Anomaliezonen.

Testbereich	Testtiefe ¹⁾ [m]	Stratigraphie ⁵⁾	Verformbarkeit Dilatometer	Anomale/erhöhte Werte v_p/v_s -Verhältnis bzw. Poissonzahl
R18-D1	91,34	Oberer Buntsandstein (so)	Wenig verformbar	-
R18-D2	106,50		Stark verformbar	-
R18-D3	157,50	Unterer Buntsandstein (su)	Moderat verformbar	Bereich 155 – 175 m
R18-D4	185,50		Moderat verformbar	(Bereich 175 – 185 m)
R18-D5	283,50		Moderat verformbar	-
R18-D6	351,10		Stark verformbar	Bereich 345 – 360 m
R18-D7	381,00		Stark verformbar	-
R18-D8	439,50		Residualgestein (cr)	Sehr stark verformbar
R18-D9	569,00		Moderat verformbar	-
R18-D10	598,50	Roter Salzton (z4RT)	Moderat verformbar	-
R18-D11	650,50	Schnee- und Rossensalz (z4SS & z4RS)	Wenig verformbar	-
R18-D12	710,50		Wenig verformbar	-
R18-D13	744,50	Roter Salzton (z4RT)	Moderat verformbar	-
R18-D14	770,00	Tonmittelsalz (z3TM)	Wenig verformbar	-
R18-D15	840,00	Orangensalz und Liniensalz (z3OS & z3LS)	Wenig verformbar	-
R18-D16	870,00		Wenig verformbar	-

Ein grundsätzlicher Trend, dass mit zunehmender Tiefe die Verformbarkeit (zumindest im Deckgebirge) zunimmt, mag sich andeuten, wird aber an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da die Testbereiche auf Grundlage der Gegenüberstellung mit weiteren Messergebnissen und Beobachtungen sowohl lithologische als auch strukturelle/tektonische Einflüsse erkennen lassen. Mitunter wurden die Testbereiche auch auf Basis bestimmter visueller Eindrücke und Auffälligkeiten in der Bohrlochgeophysik gezielt ausgewählt, um diese konkreter zu beschreiben. Damit ist allerdings nicht ausgeschlossen, dass nicht getestete Bereiche weniger oder ebenso verformbar sind.

Die Diskussion der Ergebnisse der verschiedenen Bohrlochmessungen in Verbindung mit der Bohrkernbeschreibung erfolgt in Tabelle 49.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 135
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Tabelle 49: Beschreibung und Diskussion der Gegebenheiten für die mittels Dilatometertests ermittelten Ergebnisse und Teufenbereiche moderater bis sehr starker Verformbarkeit.

Klasse	Beschreibung	Test Nr. und Teufe [m]	Stratigraphie ²⁾	Gegenüberstellung mit weiteren Ergebnissen
DM 3	Moderat verformbar	R18-D3 (157,50 m)	Unterer Buntsandstein (su)	<p>Das Ergebnis der Messung liegt innerhalb eines Teufenbereichs, für den auf Grundlage der bohrlochseismischen Messungen erhöhte Poissonzahlen bzw. erhöhte Werte des Verhältnisses v_p/v_s ausgewiesen werden und damit eine erhöhte Kompressibilität andeuten. Mögliche Hinweise auf einen strukturellen Einfluss durch Kluft- und/oder Bruchflächen werden im ABI lediglich oberhalb der Testteufe bei ca. 153 m und unterhalb bei 158,4 m erkennbar, sonst erscheint der Gebirgsbereich diesbezüglich unauffällig.</p> <p>Auch Hinweise auf erhöhte Porositäten sind im umgebenden Gebirgsbereich (oberhalb/unterhalb) nicht gegeben, lediglich weisen einzelne Lagen oder kleinere Abschnitte das geringe Vorhandensein von freien Fluiden aus. Die moderate Verformbarkeit für die Testteufe scheint im Wesentlichen in Zusammenhang mit dem Auftreten von Sandsteinen, insbesondere deutlich als Rogenstein erkennbaren Sandsteinen zu stehen, was durch die geologische Aufnahme und auch ausgewählte geophysikalische Messungen (Dichte, GR/SGR, Widerstand) ersichtlich wird.</p>
		R18-D4 (185,50 m)		<p>Die Testteufe steht ebenfalls in einem räumlichen Zusammenhang mit erhöhten Poissonzahlen, die sich aus bohrlochseismischen Daten berechnen ließen. Die dafür denkbaren Ursachen (fluidgefüllte Kluftnetzwerke, mylonitisierte Scherzonen) lassen sich allerdings im näheren Umfeld des Testbereichs im ABI nicht erkennen. Auch Widerstands- und NMR-Werten weisen im näheren Umfeld des Testbereichs keine erhöhten Porositäten oder Hinweise auf Fluidführung aus. Unter Berücksichtigung der lithologischen Beschreibung kann die erhöhte Verformbarkeit auch für diese Testteufe einschließlich der für die erhöhten Poissonzahlen ausgewiesene Anomaliezone (zumindest abschnittsweise) mit den vorhandenen Sandsteinlagen in Verbindung gebracht werden.</p>
		R18-D5 (283,50 m)		<p>Aufgrund der weitgehend unauffälligen Aussagen der geophysikalischen Bohrlochmessungen, die weder Hinweise auf Bruchflächen/zonen oder erhöhte Porositäten geben, lassen sich auch für diesen Testbereich die Sandsteinlagen oder vielmehr die Wechsellagerung von Sandstein und Tonstein als bestimmend für die erhöhte Verformbarkeit erkennen.</p>

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 136

DM 4	Stark verformbar	R18-D2 (106,50 m)	Oberer Buntsandstein (so)	<p>Unter Verweis auf die geologische Beschreibung in Verbindung mit den Widerstands- und bedingt den SGR/GR-Kurven wird die erhöhte Verformbarkeit vermutlich durch Anhydritlagen bzw. Anhydrite in Wechsellagerung mit Tonstein bestimmt.</p> <p>Da das ABI in diesem Teufenbereich vergleichsweise schlecht auflöst und die strukturgeologische Interpretation neben den steil stehenden Schichten auch den Nahbereich zu einer tiefer liegenden Störungszone ausweist, der strukturelle Einfluss in Ergänzung zu den lithologischen Gegebenheiten oder hauptsächlich dafür nicht ausgeschlossen werden.</p>
		R18-D6 (351,10 m)	Unterer Buntsandstein (su)	<p>Die in diesem Teufenbereich anstehenden Tonsteine wurden im Rahmen der geologischen Aufnahme als fest bis hart und dicht beschrieben. Allerdings wurden für die 350,25 – 354 m auch Hinweise auf tektonische Bewegungen (schichtparallele Zerschneidungshorizonte mit starker Materialzerrüttung) festgestellt.</p> <p>Eine Häufung von Trennflächen (allerdings ohne konkrete Hinweise auf Fluidführung) sowie bohrungs-/spannungsinduzierte Risse lassen sich auch für die angrenzenden Teufenbereiche ober- und unterhalb erkennen. Des Weiteren kann das ab etwa 370 m veränderte Schichteneinfallen eine Störung in der näheren Umgebung des Testbereichs mit möglichem Einfluss auf das Verformungsverhalten andeuten (Abbildung 26 (a)).</p> <p>Die mittels Dilatometer festgestellte erhöhte Verformbarkeit deckt sich ebenfalls mit den erhöhten Poissonzahlen aus der Auswertung der Bohrlochseismik für diesen Teufenbereich.</p>
		R18-D7 (381,00 m)		<p>Hinsichtlich der lithologischen Beschreibung vergleichbar mit R18-D6, wobei für diesen wie auch die angrenzenden Teufenbereiche immer wieder Brucherscheinungen beschrieben werden.</p> <p>Auch die Ergebnisse des ABI sind ähnlich denen des Tests bei 351,1 m (R18-D6).</p> <p>In Verbindung mit der strukturgeologischen Interpretation der Bohrergebnisse mit der 3D-Seismik wird analog zum Test R18-D6 ein tektonischer Einfluss durch die nahegelegene Störung bzw. den Einwirkungsbereich der Störungszone (Abbildung 26 (a)) als mindestens teilweise für die erhöhte Verformbarkeit gesehen. Der gestörte Bereich kann sowohl tektonischen Ursprungs sein, aber auch in Folge der Lösungserscheinungen im Residual durch Versturz entstanden sein.</p>
DM 5	Sehr stark verformbar	R18-D8 (439,50 m)	Residualgestein (R)	<p>Die Ergebnisse der Dilatometertests spiegeln im Grunde die als plastisch beschriebenen Tonsteine wider. Mögliche zusätzliche Hinweise, die die Verformbarkeit beeinflussen, lassen sich aus dem ABI aufgrund der z.T. schlechten Auflösung bzw. bedingt durch fehlende Gefügeelemente nicht bestimmen.</p> <p>Insgesamt fällt aber auch dieser Testbereich und vermutlich der gesamte Residualbereich unter Verweis auf die feldgeologische Aufnahme erwartungsgemäß in eine Zone erhöhter Poissonwerte.</p>

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 137
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Im Ergebnis der gesteinsmechanischen Untersuchungen (vgl. Kap.4.8.2) zeigt das Material des Deckgebirges und des Residuals eher sprödes Verformungsverhalten bei uniaxialer Belastung bei Raumtemperatur. Bei Anwendung eines Manteldrucks, die in Situ Bedingungen reflektierend, verändert sich das Verformungsverhalten ins Duktile.

Das Material des Salinars reagiert dazu im Gegensatz duktiler und deformiert plastisch, auch bei geringen mechanischen Spannungen. Die aus den Versuchen abgeleiteten, mechanischen Parameter sind im Deckgebirge deutlich heterogener als im Salinar. In Tabelle 50 sind die mittels gesteinsmechanischer Versuche ermittelten Kennwerte für die jeweiligen Lithotypen zusammengefasst.

Hinsichtlich des Deformationsverhaltens streuen die Ergebnisse von spröde über duktil und diffus bis lokalisiert. Insgesamt hängt das Deformationsverhalten der Probenkörper von der mineralogischen Zusammensetzung und im Material enthaltenen Mikrostrukturen ab. Diese Beobachtung lässt sich auf die Ergebnisse der Dilatometertests und die in dem Zusammenhang abgeleiteten Betrachtungen übertragen.

Tabelle 50: Zusammenfassung der in den gesteinsmechanischen Untersuchungen für die jeweiligen Lithotypen ermittelten Festigkeitskennwerte sowie der Kennwerte für Abrasivität und Veränderlichkeit

Lithotyp	ρ_0 [g/cm ³]	σ_{UCS} [MPa]	E_{ein} [GPa]	σ_{TCS} [MPa]	E_{tri} [GPa]	T [Mpa]	σ_t [MPa]	CAI	VÄ [Grad]
SO1	2,383	2,15 – 33,18	0,98 – 15,60	3,67 – 25,65	0,60 – 11,32	/	0,13 – 1,14	0,1 – 1,9	1 – 2
SO2	2,375	3,86 – 28,04	2,51 – 30,12	5,59 – 52,71	1,99 – 30,38	/	1,14 – 3,44	0,2 – 0,3	1 – 4
SU1	2,342	10,85 – 25,13	4,14 – 6,37	13,62 – 44,73	3,10 – 6,80	/	0,88 – 2,89	0,3 – 2,9	2 – 4
SU3	2,171	0,67 – 14,33	0,04 – 3,04	4,04 – 71,36	0,55 – 16,41	/	0,08 – 0,58	0,2 – 0,6	2 – 5
Zechstein-Residual	2,168	0,73 – 8,57	0,07 – 6,95	1,09 – 37,65	0,67 – 15,18	/	0,07 – 1,16	0,2 – 0,4	2 – 5
Steinsalz	2,174	24,68 – 29,37	6,85 – 15,39	27,90 – 66,97	1,00 – 15,40	0,40 – 2,64	/	/	/
Roter Salzton	2,351	7,08 – 12,70	1,18 – 7,60	18,29 – 32,92	2,80 – 5,50	0,64 – 0,86	/	/	4
Pegmatitanhydrit	2,652	57,08	21,96	50,03 – 93,30	14,00 – 39,77	1,60 – 2,50	/	/	/

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 138

Erläuterungen zu Tabelle 50:

ρ_{ϕ} = Dichte (Mittelwert); σ_{UCS} = Einaxiale Druckfestigkeit; E_{ein} = Elastizitätsmodul einaxial; σ_{TCS} = Triaxiale Druckfestigkeit; E_{tri} = Elastizitätsmodul triaxial; T = Zugfestigkeit; σ_t = Spaltzugfestigkeit; CAI = Abrasivitätsindex; $V\ddot{A}$ = Veränderlichkeit.

5.4.2 Gebirgsspannungen

Aus den mittels Abdruckpackertests erfassten Orientierung der induzierten bzw. stimulierten Risse (N $106^{\circ} \pm 15$) lässt sich für den Bereich des Deckgebirges der R18 eine WNW-ESE orientierte Richtung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H ableiten. Eine weitgehend vergleichbare Orientierung der Hauptspannungsrichtung im Deckgebirge wurde auch in den jüngeren Erkundungsbohrungen Remlingen 15 (N $122^{\circ} \pm 23^{\circ}$), Remlingen 10 (N $132^{\circ} \pm 8^{\circ}$) und Remlingen 11 (N $111^{\circ} \pm 14^{\circ}$) bestimmt. Das aus den ermittelten Spannungsbeträgen abgeleitete Spannungsfeld lässt sich für den oberen Bereich des Deckgebirges (bis etwa 260 m) mit $S_v < S_h < S_H$ angeben. Mit zunehmender Teufe verlagert sich das Spannungsfeld zu $S_h \leq S_v < S_H$. Auch diese Beobachtungen lassen sich weitgehend mit denen der genannten jüngeren Erkundungsbohrungen vergleichen (Verhältnis $S_H/S_v \approx 1$).

Im Zechsteinsalinar ergibt sich auf Grundlage der angewandten Berechnungen für alle Testergebnisse die vertikale Hauptspannung als minimale Gebirgsspannung ($S_v = S_{min}$), was sich hinsichtlich der Spannungsrelation S_H/S_{min} lediglich annähernd mit den Ergebnissen der Erkundungsbohrung Remlingen 11 vergleichen lässt. Demgegenüber zeigen die Ergebnisse in den Bohrungen Remlingen 15, Remlingen 15-S1 und Remlingen 10 die übereinstimmende Spannungsrelationen S_{min}/S_v , aus denen ein lithostatisches Spannungsfeld im Steinsalz abgeleitet wurde.

Die Ergebnisse der Abdruckpackertests im Zechsteinsalinar der Bohrung R18 ergeben eine E-W bis SE-NW-Orientierung der größeren horizontalen Hauptspannung S_H . Das In-Situ-Spannungsfeld in der Erkundungsbohrung R18 ist durch $S_v < S_h \leq S_H$ gekennzeichnet und deutet auf ein anisotropes Spannungsfeld im Steinsalz hin mit einer maximalen horizontalen Hauptspannung in Richtung θ_{SH} von N $116^{\circ} \pm 29^{\circ}$, welche mit der vorherrschenden horizontalen Hauptspannung aus dem Deckgebirge übereinstimmt und zudem der in Mitteleuropa vorherrschenden, tektonisch bedingten Hauptkompressionsrichtung entspricht.

6 Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Ergebnisbericht werden die gewonnenen geologischen, geophysikalischen, geotechnischen und hydrogeologischen Erkenntnisse aus der Erkundungsbohrung R18 für die weiteren schachtplanerischen Aufgaben zusammengefasst.

Das im Vorfeld der Erkundungsbohrung geplante Erkundungsprogramm wurde nahezu vollständig umgesetzt.

Die über die gesamte Bohrteufe gewonnenen Bohrkern wurden beschrieben und dokumentiert und geben somit ein vollständiges lithologisches Bild der entlang der Bohrspur und möglichen Schachttachse anzutreffenden Gesteine. Im Abgleich zum Vorprofil wurde die erwartete geologische Abfolge bestätigt. Abweichungen oder vielmehr Konkretisierungen ergaben sich bedingt durch die Unschärfen der 3D-Seismik in ihrer Auflösung lediglich für die Teufenlagen und Mächtigkeiten der angetroffenen Schichten. Unsicherheiten der stratigraphischen Zuordnung beschränken sich im Wesentlichen auf den Bereich der Störungszone, die die Schichten der Süd- und Nordflanke gegeneinander verstellt, sowie im Grenzbereich zwischen Unterem Buntsandstein und den jüngsten Zechstein-Formationen (z7 – z5). Diese Unsicherheiten spielen für die Schachtplanung und -genehmigung allerdings keine Rolle.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 139

Mittels geophysikalischer Bohrlochmessungen und geotechnischer sowie hydrogeologischer Tests lassen sich den Gesteinen und durchörterten Gebirgsbereichen entlang der Bohrspur für die Schachtplanung relevante Parameter zuweisen. Die verschiedenen ermittelten Kennwerte aus den Bohrlochmessungen und -tests sowie den Bohrkernuntersuchungen wurden den Schachtplanern bereits weitgehend parallel zu den Bohr- und Auswertarbeiten bereitgestellt.

Ebenso wurde auf Grundlage der strukturgeologischen Interpretation der Bohrdaten in Verbindung mit weiteren, insbesondere 3D-seismischen Daten ein für den räumlichen Bereich der Schachtplanung detailliertes geologisches Modell der relevanten geologischen Einheiten und strukturellen Elemente übergeben.

7 Literaturverzeichnis

- [1] DMT, Thyssen, K-Utec (2011) Konzept- und Genehmigungsplanung für einen weiteren Schacht - Ist-Analyse - Schachtansatzpunkt. Stand: 20.04.2011, BGE-KZL: 9A/23440000/GA/RA/0003/00.
- [2] GeoService (2024) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Geologische Feldaufnahme - Abschlussbericht. Stand: 10.12.2024, BGE-KZL: 9A/55211000/HA/RB/0014/00.
- [3] BGE (2024) Erkundungsbohrung R18 – End of Well Report. Stand: 04.09.2024, BGE-KZL: 9A/55211000/BE/RB/0010/00.
- [4] BGE (2022) Schachtanlage Asse II – Antrag auf Zulassung des Sonderbetriebsplans (SBPL) Nr. 01/2022 für das „Herstellen des Bohrplatzes und das Abteufen der Erkundungsbohrung Remlingen 18“ gemäß der §§ 51, 52 und 54 Bundesberggesetz (BBergG). Stand: 08.03.2022, BGE-Asse-KZL: 9A/13223000/GEH///DB/EP/0374/00.
- [5] BGE (2022) Schachtanlage Asse II – Antrag auf Zulassung des Sonderbetriebsplans (SBPL) Nr. 01/2022 für das „Herstellen des Bohrplatzes und das Abteufen der Erkundungsbohrung Remlingen 18“ gemäß der §§ 51, 52 und 54 Bundesberggesetz (BBergG), Revision 01 zum Sonderbetriebsplan Nr. 01/2022. Stand: 16.12.2022, BGE-Asse-KZL: 9A/13223000/GEH///DB/EP/0374/01.
- [6] LBEG (2023) Schachtanlage Asse II – Revision 01 zum Sonderbetriebsplan Nr. 01/2022 „Herstellen des Bohrplatzes und das Abteufen der Erkundungsbohrung Remlingen 18“, Zulassungsbescheid. Stand: 28.02.2023, BGE-Asse-KZL: 9A/13223000/GEH///DB/EV/0563/00.
- [7] BGE (2023) Schachtanlage Asse II – Sonderbetriebsplan Nr. 01/2022 Rev. 01 „Herstellen des Bohrplatzes und das Abteufen der Erkundungsbohrung Remlingen 18“, 1. Ergänzung bezüglich der „Durchführung von Walkawa-VSP-Messungen in der Bohrung Remlingen 18 sowie im Umkreis der Schachtanlage Asse II“. Stand: 06.12.2023, BGE-Asse-KZL: 9A/13223000/GEH///DB/EP/0536/00.
- [8] LBEG (2023) Schachtanlage Asse II – Sonderbetriebsplan Nr. 01/2022 Rev. 01 „Herstellen des Bohrplatzes und das Abteufen der Erkundungsbohrung Remlingen 18“, 1. Ergänzung bezüglich der „Durchführung von Walkaway-VSP-Messungen in der Bohrung Remlingen 18 sowie im Umkreis der Schachtanlage Asse II“, Zulassungsbescheid. Stand: 28.05.2024, BGE-Asse-KZL: 9A/13223000/GEH///DB/EV/0642/00.
- [9] BGE (2023) Schachtanlage Asse II – Antrag auf Zulassung des Sonderbetriebsplans Nr. 05/2023 für die „Teil-Verfüllung der Erkundungsbohrung Remlingen 18“ gemäß der §§ 51, 52 und 54 Bundesberggesetz (BBergG). Stand: 20.11.2023, BGE-Asse-KZL: 9A/13223000/GEH///DB/EP/0535/00.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 140

- [10] LBEG (2024) Schachtanlage Asse II – Sonderbetriebsplan Nr. 05/2023 „Teil-Verfüllung der Erkundungsbohrung Remlingen 18“ gemäß der §§ 51, 52 und 54 Bundesberggesetz (BBergG). Stand: 29.05.2024, BGE-Asse-KZL: 9A/13223000/GEH///DB/EV/0643/00.
- [11] GeoService (2024) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Fotodokumentation Bohrkerne. Stand: 12.12.2024, BGE-KZL: 9A/55211000/HA/RB/0015/00.
- [12] GeoService (2024) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Bohrkernaufnahmeprotokolle. Stand: 12.2024, BGE-KZL: 9A/55211000/HA/RB/0015/00.
- [13] DMT (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 – Geophysikalische Bohrlochmessungen – Abschlussbericht. Stand: 23.05.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HF/RB/0045/00.
- [14] DMT (2024) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Elektromagnetische Reflexionsmessungen (EMR) – Feldbericht. Stand: 02.12.2024, BGE-KZL: 9A/55211000/HF/RB/0043/00.
- [15] DMT (2024) Erkundungsbohrung Remlingen 18 – Seismische Bohrlochmessungen – Abschlussbericht. Stand: 02.12.2024, BGE-KZL: 9A/56100000/HF/RB/0044/00.
- [16] Solexperts; BGE (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 – Hydraulisches Tests – Abschlussbericht. Stand: 24.03.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HG/RB/0011/00.
- [17] Solexperts (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 – Gebirgsspannungsmessungen Abschlussbericht. Stand: 23.05.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/GCB/RB/0005/00.
- [18] Solexperts (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Dilatometer tests - Abschlussbericht. Stand: 26.03.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/GCB/RB/0004/00.
- [19] Ercosplan (2020) Bericht zur Revisionskartierung (M 15.000) der Salzstruktur Asse im Bereich zwischen Groß Denkte und Klein Vahlberg, Anlage 1 Geologische Karte der Salzstruktur Asse. Stand: 23.09.2020, BGE-KZL: 9A/56223000/HA/XB/0006/01.
- [20] DMT (2025) Erkundungsbohrung R18 - Geophysikalische Bohrlochmessungen - Abschlussbericht - Anlage 3 - R18-(1.) - Geologische Strukturinterpretation ATV. Stand: 23.05.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HF/RB/0047/00.
- [21] DMT (2025) Erkundungsbohrung R18 - Geophysikalische Bohrlochmessungen - Abschlussbericht - Anlage 4 - R18-(2.) - Geologische Strukturinterpretation ATV. Stand: 23.05.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HF/RB/0049/00.
- [22] DMT (2025) Erkundungsbohrung R18 - Geophysikalische Bohrlochmessungen - Abschlussbericht - Anlage 1 - R18-(1.) - Composite Log. Stand: 23.05.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HF/RB/0046/00.
- [23] DMT (2025) Erkundungsbohrung R18 - Geophysikalische Bohrlochmessungen - Abschlussbericht - Anlage 2 - R18-(2.) - Composite Log. Stand: 23.05.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HF/RB/0048/00.
- [24] BGR (2024) Richtungssensitive Georadar-Bohrlochmessungen in der Erkundungsbohrung Remlingen 18. BGR-GZ: B3.2/B50152-11/2024-0003/001.
- [25] Solexperts (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Hydraulische Tests - Testintervall R18-E1-i1. Stand: 24.03.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HG/RZ/0009/00.
- [26] Solexperts (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Hydraulische Tests - Testintervall R18-E2-i2. Stand: 24.03.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HG/RZ/0010/00.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 141

- [27] Solexperts (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Hydraulische Tests - Testintervall R18-E2-i3. Stand: 24.03.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HG/RZ/0011/00.
- [28] Solexperts (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Hydraulische Tests - Testintervall R18-E3b-i4. Stand: 24.03.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HG/RZ/0012/00.
- [29] Solexperts (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Hydraulische Tests - Testintervall R18-E3-i5/i5b. Stand: 24.03.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HG/RZ/0013/00.
- [30] Solexperts (2025) Erkundungsbohrung Remlingen 18 - Hydraulische Tests - Testintervall R18-E6-i6. Stand: 24.03.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/HG/RZ/0014/00.
- [31] Hubbert, M. K. und Willis D.G. (1957), Mechanics of Hydraulic Fracturing. Transactions of Society of Petroleum Engineers of AIME.
- [32] IFG (2025) Gesteinsmechanische Untersuchungen von Kernmaterial aus der Bohrung Asse R18. Stand: 28.05.2025, BGE-KZL: 9A/55211000/H/RB/0017/00.
- [33] Clark, I. D. und Fritz, P. (1997), Environmental Isotopes in Hydrogeology. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [34] AFC (2014) Sachstandsbericht Hydrogeologie, Asse-Deckgebirge, Bericht 1764/23, AF-Consult Switzerland AG, Baden (Schweiz). BGE-KZL: 9A/22100000/HGG/R/0003/00.
- [35] Solomon, D. K. (2000) 4He in groundwater. In: Cook, P.J., Herczeg, A.L. (Ed.): Environmental tracers in subsurface hydrology. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- [36] GFS (2002) Numerische Modellrechnungen zum Transport von Radionukliden und toxischen Begleitstoffen im Grundwasser des Deckgebirges der Asse und seiner Umgebung - Themenschwerpunkt Isotopenuntersuchung. Stand: 03.12.2002, GFS-Bericht: 180947/99/T.
- [37] Nielsen, H. et al. (1991) Lithospheric sources of sulphur. In: Krouse H.R.: Stable isotopes: Natural and anthropogenic sulphur in the environment, Scope 43. John Wiley and Sons, Chichester, 65-132.
- [38] NAGRA (1988) Applied isotope hydrogeology - A case study in northern Switzerland. In: Studies in Environmental Science Vol. 43, Elsevier.
- [39] Faure, G. und Mensing, T. M. (2005), Isotopes - Principles and applications, 3. Aufl. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- [40] Moss, P. T. (2013) Palynology and its application to geomorphology. In: Treaties on Geomorphology. Academic Press, San Diego, S. 315-325.
- [41] Heunisch, C. (2010) Mikropaläontologischer Untersuchungsbericht. Interner LBEG-Bericht 2004_3466 zur Bohrung Remlingen 5; Hannover.
- [42] Heunisch, C. (2012) Mikropaläontologischer Untersuchungsbericht. Interner LBEG-Bericht 4852_6452 zu Aufschlussproben Schöppenstedt; Hannover.
- [43] Heunisch, C. (2015) Palynologischer Untersuchungsbericht. LBEG-Bericht 6897_8445 zur Bohrung H17, Projekt 10-022 „Stilllegung Asse“; Hannover.
- [44] Heunisch, C. (2015) Palynologischer Untersuchungsbericht. LBEG-Bericht 6898_8444 zur Bohrung R9, Projekt 10-022 „Stilllegung Asse“; Hannover.
- [45] Heunisch, C. (2015) Palynologischer Untersuchungsbericht von 20 Proben der Bohrung Remlingen 5. LBEG-Bericht 7911_8478; Hannover.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 142

- [46] Heunisch, C. (2017) Palynologischer Untersuchungsbericht der Kernbohrung Malchin-5/5H, TK 2241 Teterow, MV. Interner LBEG-Bericht 8017_9864; Hannover.
- [47] Heunisch, C. (2019) Palynologischer Untersuchungsbericht der Kernbohrung Schlepzig 2/65. LBEG-Bericht 13382_15269; Hannover.
- [48] Fijalkowska-Mader, A. (2013) Palynostratigraphy, palaeoecology and palaeoclimate of the Late Permian and Triassic of the Nida Basin. Biuletyn Panstwowego Instytutu Geologicznego, 454, S.15-70.
- [49] Heunisch, C. (1999) Die Bedeutung der Palynologie für Biostratigraphie und Fazies in der Germanischen Trias. In: Hauscke, N. & Wilde, V. (1999) Trias, eine ganz andere Welt, 207-220.
- [50] Backhaus, E.; Hagdorn, H.; Heunisch, C.; Schulz, E. (2014) Biostratigraphische Gliederungsmöglichkeiten des Buntsandstein. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: J. Lepper & H.-G. Röhling für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. Schriftreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69, 151-164.
- [51] Heunisch, C.; Wierer, F. (2021) Palynomorphe der Germanischen Trias. Trias-Aufbruch in das Erdmittelalter. Pfeil, Munich, 205-217.
- [52] Ad Hoc Arbeitsgruppe Hydrogeologie (1997) Hydrogeologische Kartieranleitung. – Geologische Jahrbuch, Reihe G, 57 Seiten, Hannover.
- [53] BGE (2022) Dokumentation der hydrogeologischen Daten von 2018 – 2020. Stand: 01.2022, BGE-Asse-KZL: 9A/64212000/HDR///HG/BN/0008/00.
- [54] GFS (1994) Hydrologisches Forschungsprogramm Asse - Abschlussbericht. Stand: 04.1994, GFS-Bericht: 4/94.
- [55] Colenco (2006) Hydrogeologische Modellvorstellung. Stand: 11.2006, Colenco Bericht: 4956/07 Revision 3, Baden (Schweiz).
- [56] Gercek (2007) Poisson's ratio values for rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 44, Issue 1, Seiten 1 – 13.
- [57] Alneasan et al (2020) The effect of Poisson's ratio on the creation of tensile branches around dynamic faults, Journal of Structural Geology, Volume 131, 103950.


Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 143
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Anhang 1: Analyseergebnisse Grundwasseranalysen

Anhang 1.1: Uraninanalyse Spülprobe S0



Hydroisotop


Hydroisotop GmbH · Woelkestraße 9 · D-85301 Schweitenkirchen

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Eschenstr. 55

31224 Peine

per Email: [REDACTED]

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium



Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene
Trinkwasseruntersuchungsstelle

Schweitenkirchen, 30.11.2023
[REDACTED]

Prüfbericht Nr. 408216

Blatt 1 von 2

Probenbezeichnung: **Spülprobe S0**

Projekt:	Erkundungsbohrung R18		
Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)		
Labor-Nr.:	408216	Probenart:	flüssig
Probenahmedatum:	21.11.2023	Probenahme:	Auftraggeber
Laboreingang:	23.11.2023	Analytikbeginn:	23.11.2023
		Analytikende:	30.11.2023

Prüfparameter	Prüfergebnis	Einheit
<hr/>		
TRACER		
Uranin	0,12	µg/L

H:\BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung\2023 Azse\408216.docx

Hydroisotop GmbH Woelkestraße 9 D-85301 Schweitenkirchen Tel +49 (0)8444 9289 0 Fax +49 (0)8444 9289 29 info@hydroisotop.de www.hydroisotop.de	Geschäftsführer Dr. Lorenz Eichinger, Dr. Florian Eichinger Amtsgericht Ingolstadt HRB Nr. 390 354 VAT Nr. DE 128 953 441 St.-Nr. 124/128/50025 Zoll-Nr. DE 3003 450	Sparkasse Pfaffenholzen / Im IBAN: DE20 2715 0650 0008 1123 28 BIC: BVLADE33HAN Raiffeisenbank Schweitenkirchen IBAN: DE55 2716 0818 0001 3093 00 BIC: GENODEF33HAN
---	--	--

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 144

Prüfbericht Nr. 408216

Blatt 2 von 2

Projekt: Bestimmung des Uraningehalts
Auftraggeber: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

Prüfparameter	Prüfverfahren
---------------	---------------


Uranin	QMA 504-2/21: 2011-01; HPLC mit Fluoreszenzdetektion; Analyse nach Zentrifugation
--------	---

Legende

- + Analytik in Kooperation mit akkreditiertem bzw. qualifiziertem Prüflabor
- n.b. nicht bestimmt, Konzentration zu gering
- < für Messungen radioaktiver Parameter Angabe der Nachweisgrenze, für alle anderen Messungen Angabe der Bestimmungsgrenze
- nicht beauftragt
- x qualifiziertes Verfahren mit ausstehender Akkreditierung

Anmerkungen

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.
Rückstellmuster von Feststoffproben und flüssigen KW-Proben werden 8 Wochen nach Ergebnismitteilung, Rückstellmuster von wässrigen Proben werden 16 Wochen nach Ergebnismitteilung entsorgt - sofern nicht anders vereinbart.
Auch eine auszugsweise Veröffentlichung von Prüfergebnissen bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Hydroisotop GmbH.
Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen der Hydroisotop GmbH.
Die Hydroisotop GmbH übernimmt keine Verantwortung für die Korrektheit von Probenahmen durch Dritte.


(Geschäftsführer)
30.11.2023

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 145
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Anhang 1.2: Uraninanalysen vor und im Intervall i2

Hydroisotop GmbH · Woelkestraße 9 · D-85301 Schweitenkirchen

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Eschenstr. 55

31224 Peine

per Email: [REDACTED]

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium

DAKKS
DEUTSCH
AKKREDITIERUNGSGESELLSCHAFT
D-91-17335-01-02

Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene
Trinkwasseruntersuchungsstelle

Schweitenkirchen, 14.12.2023

Prüfbericht Nr. 409197 - 409205

Blatt 1 von 2

Projekt:	Erkundungsbohrung R18		
Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)		
Probenart:	flüssig	Probenahme:	Solexperts
Laboreingang:	10.12.2023	Analytikbeginn:	10.12.2023
		Analytikende:	11.12.2023

Lab.-Nr.	Probenbezeichnung	Probenahme-Datum	Uranin [µg/L]
409197	Spülungsprobe S1	22.11.2023, 18:00	203
409198	Spülungsprobe S2	24.11.2023, 14:00	292
409199	Spülungsprobe S3	05.12.2023, 07:50	224
409200	GW-Probe #1	05.12.2023, 16:07	0,16
409201	GW-Probe #2	05.12.2023, 17:05	142
409202	GW-Probe #3	05.12.2023, 18:05	44
409203	GW-Probe #4	05.12.2023, 19:05	21
409204	GW-Probe #5	05.12.2023, 20:05	15
409205	GW-Probe #6	05.12.2023, 20:40	11

H:\BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung\2023 Asse\409197 - 409205.docx

Hydroisotop GmbH Woelkestraße 9 D-85301 Schweitenkirchen Tel. +49 (0)8444 9289 0 Fax +49 (0)8444 9289 29 info@Hydroisotop.de www.Hydroisotop.de	Geschäftsführer Dr. Florian Eichinger Amtsgericht Ingolstadt HRB Nr. 190 354 VAT Nr. DE 128 953 441 St.-Nr. 124/128/90025 Zoll-Nr. DE 3063 496	Sparkasse Pfaffenhofen / f/m IBAN: DE 20 7215 1650 0008 1123 28 BIC: BYLADEN33PAF Raiffeisenbank Schweitenkirchen IBAN: DE 55 7216 0810 0001 3693 00 BIC: GENODEF33INP
--	--	---

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



**BUNDEGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 146

Prüfbericht Nr. 409197 - 409205

Blatt 2 von 2

Projekt: Bestimmung des Uraningehalts
Auftraggeber: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

Prüfparameter	Prüfverfahren
---------------	---------------

Uranin	QMA 504-2/21: 2011-01; HPLC mit Fluoreszenzdetektion
--------	--

Legende

- * Analytik in Kooperation mit akkreditiertem bzw. qualifiziertem Prüflabor
- n.b. nicht bestimmt, Konzentration zu gering
- < für Messungen radioaktiver Parameter Angabe der Nachweisgrenze, für alle anderen Messungen Angabe der Bestimmungsgrenze
- nicht beauftragt
- x qualifiziertes Verfahren mit ausstehender Akkreditierung

Anmerkungen

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.
Rückstellmuster von Feststoffproben und flüssigen KW-Proben werden 8 Wochen nach Ergebnismitteilung, Rückstellmuster von wässrigen Proben werden 16 Wochen nach Ergebnismitteilung entsorgt - sofern nicht anders vereinbart.
Auch eine auszugsweise Veröffentlichung von Prüfergebnissen bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Hydroisotop GmbH.
Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen der Hydroisotop GmbH.



(Geschäftsführer)
14.12.2023



Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 147

Anhang 1.3: Vollanalyse GW-Probe i2



Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes
Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für den in der
Urkundenanlage D-PL-14237-01-00 aufgeführten
Akkreditierungsumfang



Seite 1 von 3

Chemisch-physikalische Analytik

K-UTEC AG Salt Technologies
Am Pefersenschacht 7
99706 Sondershausen

Tel.: +49 3632 610-
Fax.: +49 3632 610-105
E-Mail:

Prüfbericht: 24-0027-1

Auftrag: Lösungsuntersuchung
Auftraggeber: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Eschenstraße 55
31224 Peine

Probeneingang: 12.01.2024
Probennahme: Auftraggeber
Entnahmeort:
Entnahmedatum: 05.12.2023
Probenanzahl: 1
Prüfzeitraum: 15.01.2024 bis 11.03.2024

Proben-Nr.	Proben-text
24-0027/01	Grundwasserprobe #6, Test i2, vom 05.12.2023, 20:55

Dieser Prüfbericht darf ohne Genehmigung der K-UTEC AG nicht auszugsweise veröffentlicht werden. Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Prüfbericht spezifizierten Prüfgegenstände (DIN EN ISO/IEC 17025). Es gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen, einzusehen auf der Homepage www.k-utec.de.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 148
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	



Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes
Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für den in der
Urkundenanlage D-PL-14237-01-00 aufgeführten
Akkreditierungsumfang.



Prüfbericht-Nr.: 24-0027-1
Betreff: Lösungsuntersuchung

Seite 2 von 3

Probenart: Salzlösung
Proben-Nr.: 24-0027/01
Messzeitraum: 15.01.2024 bis 11.03.2024
Grundwasserprobe #6, Test i2, vom 05.12.2023, 20:55

Probenbez.: GW #6

Parameter	Verfahren	Messwert	Dim.	Bestim.- grenze
Dichte (Labor)	DEV-C 9*	1,007	g/cm ³	
Temperatur (Labor)	DIN 38 404-C 4*	22	°C	
Leitfähigkeit	K-UTEC 109: 2016-03	7030	µS/cm	1
Redox-Spannung	DIN 38 404-C 6*	546	mV	
Sauerstoff O ₂	DIN EN 25814-G22*	3,10	mg/l	0,01
pH-Wert	K-UTEC 108: 2016-03	7,31	-	
Natrium	K-UTEC 6: 2016-04	1120	mg/l	1
Kalium	K-UTEC 6: 2016-04	22,3	mg/l	1,0
Magnesium	K-UTEC 112: 2016-03	91	mg/l	10
Calcium	K-UTEC 6: 2016-04	651	mg/l	2
Chlorid	DIN EN ISO 10304-D20*	630	mg/l	20
Sulfat	DIN EN ISO 10304-D20*	2780	mg/l	3
Mangan	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	0,5
Eisen (II)	DIN 38406-E1*	n.n.	mg/l	0,6
Eisen-III	DIN 38406-E1*	2,4	mg/l	0,6
Carbonat	DIN ISO 10693*	0,91	mg/l	0,50
CO ₂	DIN EN 1484-H 3*	26,4	mg/l	0,40
Hydrogencarbonat	DEV-D8*	420	mg/l	0,5
Lithium	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	2
Strontium	K-UTEC 6: 2016-04	9,84	mg/l	0,20
Cäsium	AAS*	n.n.	mg/l	2
Rubidium	AES*	n.n.	mg/l	1,0
Aluminium	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	1
Arsen	K-UTEC 118: 2016-03	13,4	µg/l	10,0
Barium	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	0,2
Blei	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	0,2
Cadmium	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	0,2
Chrom	K-UTEC 6: 2016-04	0,11	mg/l	0,10
Cobalt	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	0,2
Kupfer	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	1
Nickel	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	0,5
Silicium	K-UTEC 6: 2016-04	9,53	mg/l	5,00
Titán	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	0,5
Zink	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	0,2
Bor	K-UTEC 6: 2016-04	3,64	mg/l	0,20
Bromid	DIN EN ISO 10304-D20*	n.n.	mg/l	1
Phosphor	K-UTEC 6: 2016-04	n.n.	mg/l	1
Phosphat	DIN EN ISO 11885 - E22*	n.n.	mg/l	3
Kaliumhexacyanoferrat(II)	DIN 38 405-D 13-1-3*	0,01	mg/l	0,01
DOC	K-UTEC 122: 2016-03	185	mg/l	5

* nicht akkreditierter Parameter
n.n. Messergebnis ist unterhalb Bestimmungsgrenze
Dim. Dimension
bezogen auf Trockensubstanz

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 149



Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes
Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für den in der
Urkundenanlage D-PL-14237-01-00 aufgeführten
Akkreditierungsumfang.



Prüfbericht-Nr.: 24-0027-1 Seite 3 von 3
 Betreff: Lösungsuntersuchung

Proben-Nr.: 24-0027/01 Fortsetzung

Parameter	Verfahren	Messwert	Dim.	Bestim.- grenze
TDC	K-UTEC 122: 2016-03	275	mg/l	5
Thorium	-	siehe Anlage	-	
Uran	-	siehe Anlage	-	
Ammonium	K-UTEC 116: 2016-04	n.n.	mg/l	0,6
Nitrit	K-UTEC 116: 2016-03	n.n.	mg/l	0,22
Nitrat	K-UTEC 5: 2017-11	4,69	mg/l	0,20
Fluorid	DIN 38 405-D 4-1*	0,43	mg/l	0,20
Iodid	DIN EN ISO 10304-D20*	n.n.	mg/l	0,5
CSB	K-UTEC 15: 2016-05	449	mg/l	15

Sondershausen, den 11.03.2024



Laborleiter

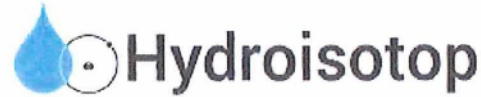
Anlage: Prüfbericht 409205 (4 S.)

* nicht akkreditierter Parameter
 n.n. Messergebnis ist unterhalb Bestimmungsgrenze
 Dim. Dimension
 # bezogen auf Trockensubstanz

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 150
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	



Hydroisotop GmbH · Woolkestraße 9 · D-85301 Schweitenkirchen

K-UTECH AG Salt Technologies
Am Petersenschacht 7

99706 Sondershausen

per Email: [REDACTED]

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium



Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene
Trinkwasseruntersuchungsstelle

Schweitenkirchen, 06.03.2024

Prüfbericht Nr. 409205

Blatt 1 von 4

Probenbezeichnung: GW-Probe #6

Projekt:	Remlingen R18		
Projekt Nr.:	6858 - R312107		
Projekt:	Hydrogeologie Asse (TEK-GW 2/2)		
Belegnr.:	2022-20XXX-CPA / LV BGE (46001180)		
Labor-Nr.:	409205	Probenart:	flüssig
Probenahmedatum:	05.12.2023, 20:40	Probenahme:	Solexperts
Laboreingang:	10.12.2023	Analytikbeginn:	10.12.2023
		Analytikende:	06.03.2024

Prüfparameter	Prüfergebnis	Einheit
METALLE		
Thorium	0,0044 (#)	mg/l
Uran	0,0040 (#)	mg/l

\\s01\projekte\K-UTECH\BGE\2024\409205_R18.docx

Hydroisotop GmbH
Woolkestraße 9
D-85301 Schweitenkirchen
Tel. +49 (0)8444 9289 0
Fax +49 (0)8444 9289 29
info@hydroisotop.de
www.hydroisotop.de

Geschäftsführer
Dr. Florian Eichinger
Amtsgericht Ingolstadt
HRB Nr. 190 354
VAT Nr. DE 128 953 441
St.-Nr. 124/128/99025
Zoll-Nr. DE 3063 496

Sparkasse Pfaffenhofen / Ilm
IBAN: DE20 7215 1650 0008 1123 28
BIC: SPYLADE33PFA

Raiffeisenbank Schweitenkirchen
IBAN: DE55 2716 0818 0001 3693 00
BIC: GENODEF33NIP

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 151

Prüfbericht Nr. 409205

Blatt 2 von 4

Probenbezeichnung: **GW-Probe #6**

Projekt: Remlingen R18
Projekt Nr.: 6858 - R312107
Projekt: Hydrogeologie Asse (TEK-GW 2/2)
Belegnr.: 2022-20XXX-CPA / LV BGE (46001180)
Labor-Nr.: 409205
Probenart: flüssig
Probenahmedatum: 05.12.2023, 20:40
Probenahme: Solexperts
Laboreingang: 10.12.2023
Analytikbeginn: 10.12.2023
Analytikende: 06.03.2024

Prüfparameter	Prüfergebnis	Einheit
ISOTOPE		
Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$)	-9,50	‰
Deuterium ($\delta^2\text{H}$)	-63,6	‰
Deuterium-Exzess	12,40	‰
Tritium (^3H)	$0,3 \pm 0,4$	TU
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C-DIC}$)	-6,2	‰
Kohlenstoff-14 ($^{14}\text{C-DIC}$)	$20,8 \pm 0,2$	%-modern
Schwefel-34 ($\delta^{34}\text{S-SO}_4$)	16,1	‰
Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O-SO}_4$)	13,1	‰
Strontiumisotopenverhältnis ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	$0,70898 \pm 0,00003$	
Helium-3 (^3He)	1,25E-13	ccSTP/g
Helium-4 (^4He)	2,30E-06	ccSTP/g
Heliumisotopenverhältnis ($^3\text{He}/^4\text{He}$)	5,43E-08	
Neon (Ne)	2,40E-07	ccSTP/g

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

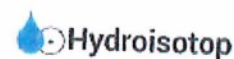
Blatt: 152

Prüfbericht Nr. 409205

Blatt 3 von 4

Projekt: Remlingen R18
Projekt Nr.: 6858 - R312107
Belegnr.: 2022-20XXX-CPA / LV BGE (46001180)
Auftraggeber: K-UTEC AG Salt Technologies

Prüfparameter	Prüfverfahren
Tritium (³ H)	QMA 504-2/1: 2011-09; Flüssigkeitsszintillationspektrometrie (LSC) nach elektrolytischer Anreicherung, gemessen in Tritiumeinheiten (TU) mit zweifacher Standardabweichung (1 TU = 0,119 Bq/L); Ergebnis bezogen auf Messdatum (keine Halbwertszeitkorrektur)
Helium-3 (³ He)	Massenspektrometrie nach kryogener Trennung
Helium-4 (⁴ He)	Massenspektrometrie nach kryogener Trennung
Heliumisotopenverhältnis (³ He/ ⁴ He)	Massenspektrometrie nach kryogener Trennung
Deuterium-Exzess	berechnet
Kohlenstoff-13 (δ ¹³ C-DIC direkt)	QMA 504-2/6: 2012-02; Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (IRMS); bezogen auf VPDB-Std.: 1σ = ± 0,3 ‰
Kohlenstoff-14 (14C-TIC)	Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS); gemessen in ‰-modern mit zweifacher Standardabweichung, 100%-modern = 0,226 Bq/g Kohlenstoff
Sauerstoff-18 (δ ¹⁸ O-SO ₄)	QMA504-2/29: 2015-03; Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (EA-IRMS); bezogen auf VSMOW-Std.: 1σ = ± 0,5 ‰
Schwefel-34 (δ ³⁴ S-SO ₄)	QMA504-2/28: 2015-03; Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (EA-IRMS) bezogen auf V-COT-Std.; 1σ = ± 0,5 ‰
Strontiumisotopenverhältnis (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)	Thermionen-Massenspektrometrie (TIMS) nach Probenaufschluss und Element-Matrix-Abtrennung
Thorium	DIN EN ISO 17294-2 (E29), ICP-MS
Uran	DIN EN ISO 17294-2 (E29), ICP-MS
Deuterium (δ ² H)	QMA 504-2/23: 2012-02; Cavity-Ringdown-Spektrometrie (CRDS); bezogen auf VSMOW-Std.: 1σ = ± 1,5 ‰
Sauerstoff-18 (δ ¹⁸ O)	QMA 504-2/23: 2012-02; Cavity-Ringdown-Spektrometrie (CRDS); bezogen auf VSMOW-Std.: 1σ = ± 0,15 ‰



Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 153

Prüfbericht Nr. 409205

Blatt 4 von 4

Projekt: Remlingen R18
Projekt Nr.: 6858 - R312107
Belegnr.: 2022-20XXX-CPA / LV BGE (46001180)
Auftraggeber: K-UTEC AG Salt Technologies

Legende

- * Analytik in Kooperation mit akkreditiertem bzw. qualifiziertem Prüflabor
- n.b. nicht bestimmt, Konzentration zu gering
- < für Messungen radioaktiver Parameter Angabe der Nachweisgrenze, für alle anderen Messungen Angabe der Bestimmungsgrenze
- nicht beauftragt
- x qualifiziertes Verfahren mit ausstehender Akkreditierung
Probe war nicht korrekt stabilisiert, Minderbefund nicht auszuschließen.
- # Probe war nicht filtriert. Nachsäuerung kann zu erhöhten Befunden führen.

Anmerkungen

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.
 Rückstellmuster von Feststoffproben und flüssigen KW-Proben werden 8 Wochen nach Ergebnismitteilung, Rückstellmuster von wässrigen Proben werden 16 Wochen nach Ergebnismitteilung entsorgt - sofern nicht anders vereinbart.
 Auch eine auszugsweise Veröffentlichung von Prüfergebnissen bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Hydroisotop GmbH.
 Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen der Hydroisotop GmbH.



(Geschäftsführer)
06.03.2024

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 154

Anhang 1.4: Uraninanalysen in den Intervallen i4 und i5b



Hydroisotop GmbH · Woelkestraße 9 · D-85301 Schweitenkirchen

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Eschenstr. 55

Durch die DAKS nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium

31224 Peine



Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene
Trinkwasseruntersuchungsstelle

per Email: [REDACTED]

Schweitenkirchen, 07.03.2024

Prüfbericht Nr. 411976 - 411985

Blatt 1 von 2

Projekt: **R312106**
 Auftrag: **45234295 Remlingen 18**
 Auftraggeber: **Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)**
 Angebot: **013-2024 / GL**
 Probenart: **flüssig** Probenahme: **BGE Peine**
 Laboreingang: **19.02.2024** Analytikbeginn: **19.02.2024**
 Analytikende: **06.03.2024**

Lab.-Nr.	Probenbezeichnung	Probenahme-Datum	Uranin [µg/L]
411976	Spülprobe BA3-50	22.01.2024, 15:15	793,0
411977	i4 RW #1	07.02.2024, 03:50	106,0
411978	i4 RW #2	07.02.2024, 11:00	126,0
411979	i4 RW #3	07.02.2024, 19:15	139,0
411980	i4 RW #4	08.02.2024, 01:00	109,0
411981	i4 RW #5	08.02.2024, 06:00	78,90
411982	i5b RW #1	26.01.2024, 22:00	217,0
411983	i5b RW #2	27.01.2024, 04:00	156,0
411984	i5b RW #3	27.01.2024, 08:15	29,20
411985	i5b RW #4	27.01.2024, 11:00	17,70

Hydroisotop GmbH
Woelkestraße 9
D-85301 Schweitenkirchen
Tel +49 (0)8444 9389 0
Fax +49 (0)8444 9389 25
info@hydroisotop.de
www.hydroisotop.de

Geschäftsführer
Dr. Florian Eichinger
Amtsgericht Ingolstadt
HRB Nr. 190 354
VAT Nr. DE 128 553 441
St.-Nr. 12/4/128/00025
Zoll-Nr. DE 3063 456

Sparkasse Pfaffenhofen / Im
IBAN: DE 20 7215 1650 0008 1123 28
BIC: BYLADEM3333

Raiffeisenbank Schweitenkirchen
IBAN: DE 55 7216 0818 0001 3693 00
BIC: GENODE33HAN

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 155

Prüfbericht Nr. 411976 - 411985

Blatt 2 von 2

Projekt: R312106
Auftraggeber: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

Prüfparameter	Prüfverfahren
---------------	---------------

Uranin	QMA 504-2/21: 2011-01; HPLC mit Fluoreszenzdetektion
--------	--

Legende

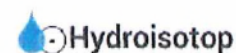
- * Analytik in Kooperation mit akkreditiertem bzw. qualifiziertem Prüflabor
- n.b. nicht bestimmt, Konzentration zu gering
- < für Messungen radioaktiver Parameter Angabe der Nachweisgrenze, für alle anderen Messungen Angabe der Bestimmungsgrenze
- nicht beauftragt
- x qualifiziertes Verfahren mit ausstehender Akkreditierung

Anmerkungen

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.
Rückstellmuster von Feststoffproben und flüssigen KW-Proben werden 8 Wochen nach Ergebnismitteilung, Rückstellmuster von wässrigen Proben werden 16 Wochen nach Ergebnismitteilung entsorgt - sofern nicht anders vereinbart.
Auch eine auszugsweise Veröffentlichung von Prüfergebnissen bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Hydroisotop GmbH.
Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen der Hydroisotop GmbH.



(Geschäftsführer)
07.03.2024



Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 156

Anhang 1.5: Vollanalyse GW-Probe i4 und i5b



Durch die DAKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes
Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für den in der
Urkundenanlage D-PL-14237-01-00 aufgeführten
Akkreditierungsumfang.



Seite 1 von 5

Chemisch-physikalische Analytik

K-UTEC AG Salt Technologies
Am Petersenschacht 7
99706 Sonndershausen

Tel.: +49 3632 610-
Fax.: +49 3632 610-105
E-Mail:

Prüfbericht: 24-0343-1

Auftrag: Lösungsuntersuchung
Auftraggeber: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Eschenstraße 55
31224 Peine

Probeneingang: 26.02.2024
Probenahme: Auftraggeber
Entnahmetort:
Entnahmedatum:
Probenanzahl: 2
Prüfzeitraum: 29.02.2024 bis 02.04.2024

Proben-Nr.	Probenext
24-0343/01	i4 RW #5 vom 08.02.2024, 06:00
24-0343/02	i5b RW #4 vom 27.01.2024, 11:00

Dieser Prüfbericht darf ohne Genehmigung der K-UTEC AG nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Prüfbericht spezifizierten Prüfgegenstände (DIN EN ISO/IEC 17025). Es gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen, einzusehen auf der Homepage www.k-utec.de.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 158



Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes
Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für den in der
Urkundenanlage D-FL-14237-01-00 aufgeführten
Akkreditierungsumfang.



Prüfbericht-Nr.: 24-0343-1
Betreff: Lösungsuntersuchung

Seite 3 von 5

Proben-Nr.: 24-0343/01 Fortsetzung

Parameter	Verfahren	Messwert	Dim.	Bestim.- grenze
TDC	K-UTEC 122: 2016-03	598	mg/l	5
Thorium	-	siehe Anlage	-	
Uran	-	siehe Anlage	-	
Ammonium	K-UTEC 116: 2016-04	4,96	mg/l	0,60
Nitrit	K-UTEC 115: 2016-03	105	mg/l	0,22
Nitrat	K-UTEC 5: 2017-11	146	mg/l	0,2
Fluorid	DIN 38 405-D 4-1*	0,44	mg/l	0,20
Iodid	DIN EN ISO 10304-D20*	n.n.	mg/l	5
CSB	K-UTEC 15: 2016-05	380	mg/l	15

* nicht akkreditierter Parameter
n.n. Messergebnis ist unterhalb Bestimmungsgrenze
Dim. Dimension
bezogen auf Trockensubstanz

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 160
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	



Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes
Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt nur für den in der
Urkundenanlage D-FL-14237-01-00 aufgeführten
Akkreditierungsumfang.



Prüfbericht-Nr.: 24-0343-1 Seite 5 von 5
Betreff: Lösungsuntersuchung

Proben-Nr.: 24-0343/02 Fortsetzung

Parameter	Verfahren	Messwert	Dim.	Bestim.- grenze
TDC	K-UTEC 122: 2016-03	287	mg/l	5
Thorium	-	siehe Anlage	-	
Uran	-	siehe Anlage	-	
Ammonium	K-UTEC 116: 2016-04	n.n.	mg/l	0,6
Nitrit	K-UTEC 115: 2016-03	n.n.	mg/l	0,22
Nitrat	K-UTEC 5: 2017-11	n.n.	mg/l	0,2
Fluorid	DIN 38 405-D 4-1*	0,22	mg/l	0,20
Iodid	DIN EN ISO 10304-D20*	n.n.	mg/l	5
CSB	K-UTEC 15: 2016-05	818	mg/l	15

Sondershausen, den 02.04.2024



Laborleiter

Anlage: PB Nr. 411974 - 411975 (2 S.)

* nicht akkreditierter Parameter
n.n. Messergebnis ist unterhalb Bestimmungsgrenze
Dim. Dimension
bezogen auf Trockensubstanz

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 161



Hydroisotop GmbH · Woelkestraße 9 · D-85301 Schweitenkirchen

K-UTEC AG Salt Technologies
Am Petersenschacht 7

99706 Sondershausen

per Email: [REDACTED]

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium



Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene
Trinkwasseruntersuchungsstelle

Schweitenkirchen, 06.03.2024

Vorab-Prüfbericht Nr. 411974 - 411975

Blatt 1 von 2

Projekt:	R312106		
Auftraggeber:	K-UTEC AG Salt Technologies		
Probenart:	flüssig	Probenahme:	BGE Peine
Laboreingang:	19.02.2024	Analytikbeginn:	19.02.2024
		Analytikende:	06.03.2024

Prüfparameter	Prüfergebnis		Einheit
	i4 RW #5	i5b RW #4	
PROBENBEZEICHNUNG			
Labornummer	411974	411975	
Probenahmedatum	08.02.2024, 06:00	27.01.2024, 11:00	

METALLE			
Thorium	0,026 (#)	0,0094 (#)	mg/l
Uran	0,014 (#)	0,0039 (#)	mg/l

M:\K-UTEC\BGE\2024\411974 - 411975_Vorb_U_TH_618.docx

Hydroisotop GmbH
Woelkestraße 9
D-85301 Schweitenkirchen
Tel. +49 (0)8444 9289 0
Fax +49 (0)8444 9289 29
info@hydroisotop.de
www.hydroisotop.de

Geschäftsfiliale
Dr. Lorenz Eichinger, Dr. Florian Eichinger
Amtsgericht Ingolstadt
HRB Nr. 190 354
VAT Nr. DE 128 953 441
St.-Nr. 124/128/90025
Zoll-Nr. DE 3001 456

Sparkasse Pfaffenhofen / Ilm
IBAN: DE20 2715 1650 0008 103 28
BIC: SPK1233

Raiffeisenbank Schweitenkirchen
IBAN: DE55 2210 0819 0001 3033 00
BIC: GENODE33

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 162

Vorab-Prüfbericht Nr. 411974 - 411975

Blatt 2 von 2

Projekt: R312106
 Auftraggeber: K-UTEC AG Salt Technologies

Prüfparameter	Prüfverfahren
Thorium	DIN EN ISO 17294-2 (E29), ICP-MS *
Uran	DIN EN ISO 17294-2 (E29), ICP-MS *

Legende

- * Analytik in Kooperation mit akkreditiertem bzw. qualifiziertem Prüflabor
- n.b. nicht bestimmt, Konzentration zu gering
- < für Messungen radioaktiver Parameter Angabe der Nachweisgrenze, für alle anderen Messungen Angabe der Bestimmungsgrenze
- nicht beauftragt
- x qualifiziertes Verfahren mit ausstehender Akkreditierung
- Probe war nicht korrekt stabilisiert, Minderbefund nicht auszuschließen.
- # Probe war nicht filtriert. Nachsäuerung kann zu erhöhten Befunden führen.

Anmerkungen

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.
 Rückstellmuster von Feststoffproben und flüssigen KW-Proben werden 8 Wochen nach Ergebnismitteilung, Rückstellmuster von wässrigen Proben werden 16 Wochen nach Ergebnismitteilung entsorgt - sofern nicht anders vereinbart.
 Auch eine auszugsweise Veröffentlichung von Prüfergebnissen bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Hydroisotop GmbH.
 Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen der Hydroisotop GmbH.


 (Geschäftsführer)
 06.03.2024



Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 163
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Anhang 1.6: Isotopenanalysen GW-Probe i4 und i5b

Hydroisotop

Hydroisotop GmbH - Waelkestraße 9 - D-85301 Schweitenkirchen

K-UTEC AG Salt Technologies
Am Petersenschacht 7

99706 Sondershausen

per Email: [REDACTED]

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium

DAkkS
Deutsche
Akreditierungsstelle
D-PL-1313102-00

Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene
Trinkwasseruntersuchungsstelle

Schweitenkirchen, 06.06.2024

Prüfbericht Nr. 411974 - 411975 Blatt 1 von 4

Projekt:	Remlingen		
Projekt:	R312106		
Projekt:	Hydrogeologie Asse (TEK-GW 2/2)		
Belegnr.	2022-20XXX-CPA / LV BGE (46001180)		
Auftraggeber:	K-UTEC AG Salt Technologies		
Probenart:	flüssig	Probenahme:	BGE Peine
Laboreingang:	19.02.2024	Analytikbeginn:	19.02.2024
		Analytikende:	06.06.2024

Prüfparameter	Prüfergebnis		Einheit
PROBENBEZEICHNUNG	i4 RW #5	i5b RW #4	
	24-0343/01	24-0343/02	
Labornummer	411974	411975	
Probenahmedatum	08.02.2024, 06:00	27.01.2024, 11:00	
METALLE			
Thorium	0,026 (#)	0,0094 (#)	mg/l
Uran	0,014 (#)	0,0039 (#)	mg/l

Hydroisotop GmbH
Waelkestraße 9
D-85301 Schweitenkirchen
Tel +49 (0)8444 9289 0
Fax +49 (0)8444 9289 29
info@hydroisotop.de
www.hydroisotop.de

Geschäftsführer
Dr. Florian Eichinger
Amtsgericht Ingolstadt
HRB Nr. 190 354
VAT Nr. DE 128 953 441
St.-Nr. 124/128/90025
Zoll-Fr. DE 3063 496

SparKasse Pfaffenhofen / Ilm
IBAN: DE20 7215 1650 0008 1123 28
BIC: BWL1ADEMIPAF

Raiffeisenbank Schweitenkirchen
IBAN: DE55 7216 0818 0001 3693 00
BIC: GENODEF33HAN

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 165
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00	

Prüfbericht Nr. 411974 - 411975

Blatt 3 von 4

Projekt: Remlingen
Projekt: R312106
Auftraggeber: K-UTEC AG Salt Technologies

Prüfparameter	Prüfverfahren
Thorium	DIN EN ISO 17294-2 (E29), ICP-MS
Uran	DIN EN ISO 17294-2 (E29), ICP-MS
Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$ -H ₂ O)	QMA 504-2/23: 2012-02; Cavity-Ringdown-Spektrometrie (CRDS); bezogen auf VSMOW-Std.: $1\sigma = \pm 0,15 \text{ ‰}$
Deuterium ($\delta^2\text{H}$ -H ₂ O)	QMA 504-2/23: 2012-02; Cavity-Ringdown-Spektrometrie (CRDS); bezogen auf VSMOW-Std.: $1\sigma = \pm 1,5 \text{ ‰}$
Deuterium-Exzess	berechnet
Tritium (³ H)	QMA 504-2/1: 2011-09; Flüssigkeitsszintillationspektrometrie (LSC) nach elektrolytischer Anreicherung, gemessen in Tritiumeinheiten (TU) mit zweifacher Standardabweichung (1 TU = 0,119 Bq/L); Ergebnis bezogen auf Messdatum (keine Halbwertszeitkorrektur)
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C}$ -DIC)	QMA 504-2/6: 2012-02; Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (IRMS); bezogen auf VPDB-Std.: $1\sigma = \pm 0,3 \text{ ‰}$
Kohlenstoff-14 (¹⁴ C-DIC)	Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS); gemessen in ‰-modern mit zweifacher Standardabweichung, 100 $\text{‰-modern} = 0,226 \text{ Bq/g Kohlenstoff}$
Schwefel-34 ($\delta^{34}\text{S}$ -SO ₄)	QMA504-2/28: 2015-03; Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (EA-IRMS) bezogen auf V-CDT-Std.; $1\sigma = \pm 0,5 \text{ ‰}$
Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$ -SO ₄)	QMA504-2/29: 2015-03; Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (EA-IRMS); bezogen auf VSMOW-Std.: $1\sigma = \pm 0,5 \text{ ‰}$
Strontiumisotopenverhältnis (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)	Thermionen-Massenspektrometrie (TIMS) nach Probenaufschluss und Element-Matrix-Abtrennung
Helium-3 (³ He)	Massenspektrometrie nach kryogener Trennung
Helium-4 (⁴ He)	Massenspektrometrie nach kryogener Trennung
Heliumisotopenverhältnis (³ He/ ⁴ He)	Massenspektrometrie nach kryogener Trennung
Neon (Ne)	Massenspektrometrie nach kryogener Trennung



Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 166

Prüfbericht Nr. 411974 - 411975

Blatt 4 von 4

Projekt: Remlingen
 Projekt: R312106
 Auftraggeber: K-UTECH AG Salt Technologies

Legende

- * Analytik in Kooperation mit akkreditiertem bzw. qualifiziertem Prüflabor
- n.b. nicht bestimmt, Konzentration zu gering
- < für Messungen radioaktiver Parameter Angabe der Nachweisgrenze, für alle anderen Messungen Angabe der Bestimmungsgrenze
- nicht beauftragt
- x qualifiziertes Verfahren mit ausstehender Akkreditierung
- # Probe war nicht korrekt stabilisiert, Minderbefund nicht auszuschließen.
- # Probe war nicht filtriert. Nachsäuerung kann zu erhöhten Befunden führen.

Anmerkungen

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.
 Rückstellmuster von Feststoffproben und flüssigen KW-Proben werden 8 Wochen nach Ergebnismittellung, Rückstellmuster von wässrigen Proben werden 16 Wochen nach Ergebnismittellung entsorgt - sofern nicht anders vereinbart.
 Auch eine auszugsweise Veröffentlichung von Prüfergebnissen bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Hydroisotop GmbH.
 Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen der Hydroisotop GmbH.



(Geschäftsführer)
06.06.2024



Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 167

Anhang 2: Stratigraphischer Untersuchungsbericht zur Bohrung Remlingen 18

BUNDESANSTALT FÜR
GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
Fachbereich 4.2 GeoInformationen,
Stratigraphie, Bibliothek
Postfach 510153, 30631 Hannover
Tel.: [REDACTED]

LANDESAMT FÜR
BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE
Ref. L 2.8 Stratigraphie, Sammlungen

Hannover, den 05.12.2024

Stratigraphischer Untersuchungsbericht zur Bohrung Remlingen-18

AuftraggeberIn: [REDACTED] (für BGR)

Auftragsdatum: 01.08.2024

Blatt: TK25 3830, Schöppenstedt

PaStraLa-Nr.: 21772_25884

Koordinaten: R 4409676,61; H 5777897,45 (GK 4)

Staat: Bundesrepublik Deutschland

Projekt: Geologische Bearbeitung - Salzstruktur, Remlingen-18

AutorIn: [REDACTED]

Labor-Proben-Nr.: P84501 – P84512

Anzahl: 12

Methodik

12 Proben der Bohrung Remlingen-18 wurden nach dem säurefreien Verfahren modifiziert nach Moss (2013) palynologisch aufbereitet und mit dem Ziel einer biostratigraphischen Einstufung nach Pollen, Sporen und Algen untersucht. Die Bestimmung und Nomenklatur der Palynomorphen beruht auf Heunisch (2010, 2012, 2015a, b, c, 2017, 2019) und Fijalkowska-Mader (2013), die stratigraphische Einstufung auf Heunisch (1999), Backhaus et al. (2015) sowie Heunisch & Wiener (2021).

Ergebnisse

P84512 bzw. 24As0395 (452,85 – 452,95 m)

P84511 bzw. 24As0394 (435,00 – 435,05 m)

P84510 bzw. 24As0393 (426,85 – 426,92 m)

P84509 bzw. 24As0392 (418,67 – 418,73 m)

P84508 bzw. 24As0391 (406,19 – 406,23 m)

P84507 bzw. 24As0390 (405,58 – 405,60 m)

P84506 bzw. 24As0389 (400,46 – 400,47 m)

P84505 bzw. 24As0388 (398,73 – 398,79 m)

Die acht Proben, die lithostratigraphisch dem Zechstein zugeordnet wurden, sind alle nahezu frei von organischem Material. In den meisten Proben sind lediglich kleine opake Phytoklasten vorhanden, die schlecht gerundet sind und Größen zwischen 30 und 100 µm besitzen (Abb. 1A). Nur gelegentlich treten auch durchscheinende, hellere Phytoklasten (Abb. 1B) in ähnlichen Größen auf. Pollen oder Sporen sind in den Proben nicht enthalten. Lediglich in Probe P84510 bzw. 24As0393 kommen kugelige Palynomorphen (Abb. 1C) vor, bei denen es sich möglicherweise um Algenzysten handelt.

Stratigraphische Einstufung: Keine biostratigraphische Einstufung möglich

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 168

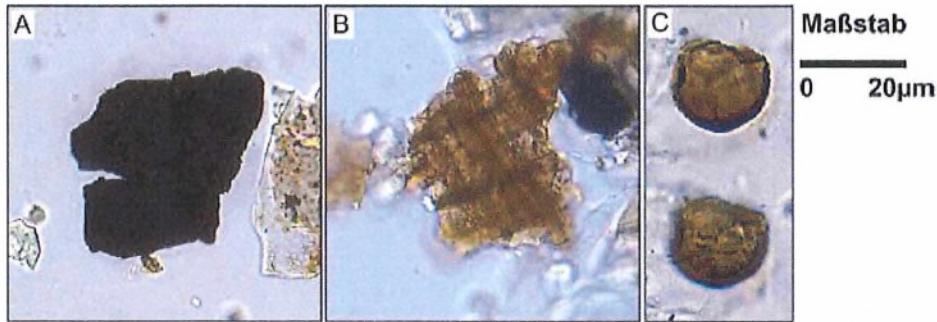


Abb. 1: A) Opaker Phytoklast, Probe P84507 bzw. 24As0390; B) Durchscheinender Phytoklast, Probe P84507 bzw. 24As0390; C) Algenzyste?, Probe P84510 bzw. 24As0393

P84504 bzw. 24As0387 (395,45 – 395,47 m)

Die Probe enthält eine Vielzahl an Palynomorphen und Phytoklasten. Unter den Palynomorphen sind große, dünnwandige, kugelige Organismen dominierend, die Durchmesser von 30 bis 100 µm erreichen. Es handelt sich um Zellen der Sammelgattung *Reduviasporonites* (Abb. 2F – L), die als Grünalgen (Zygnemataceen, z.B. Heunisch & Wierer, 2021) oder Pilzsporen (Visscher et al. 2011, Rampino & Eshet 2018) angesprochen werden. Unabhängig von der Zuordnung zu Algen oder Pilzsporen ist das häufige bis massenhafte Auftreten dieser Palynomorphen typisch für die Übergangsphase zwischen dem Perm und der Trias (Heunisch & Wierer 2021) und kennzeichnend für die Palynomorphen-Zone GTr1 aus der Germanischen Trias (Heunisch 1999, Heunisch & Wierer 2021). Allerdings kommen auch einige bisaccate Pollen der Art *Protohaploxylinus pantii* (Abb. 2D, E) sowie vereinzelt verschiedene Sporen aus dem *Verrucosisporites/Cycloverrutriletes*-Formkreis (Abb. 2A) und cf. *Deltoispora* sp. (Abb. 2B) vor. *P. pantii* ist die Leitform der Palynomorphen-Zone GTr2 (Heunisch 1999, Heunisch & Wierer 2021) aus dem unteren Buntsandstein, die den oberen Teil der Calvörde- sowie die Bernburg-Formation in der Germanischen Trias umfasst.

Anhand des Palynomorphen-Spektrums stammt die Probe daher vermutlich aus dem Übergangsbereich der Palynomorphen-Zonen GTr1 und GTr2 und ist somit biostratigraphisch der Calvörde-Formation bzw. der Basis der unteren Trias (unterer Buntsandstein) zuzuordnen. Zwar kommt auch ein bisaccater Pollen der Art *Klausipollenites schaubergeri* (Abb. 2C) in der Probe vor, die eine Leitform aus dem Zechstein ist. Da aber andere charakteristische palynologische Taxa aus dem Perm fehlen, ist der Pollen vermutlich aus dem Zechstein umgelagert.

Stratigraphische Einstufung: Unterer Buntsandstein (Calvörde-Formation, su; Palynomorphenzonen GTr1/GTr2 nach Heunisch (1999) und Heunisch & Wierer (2021))

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 169

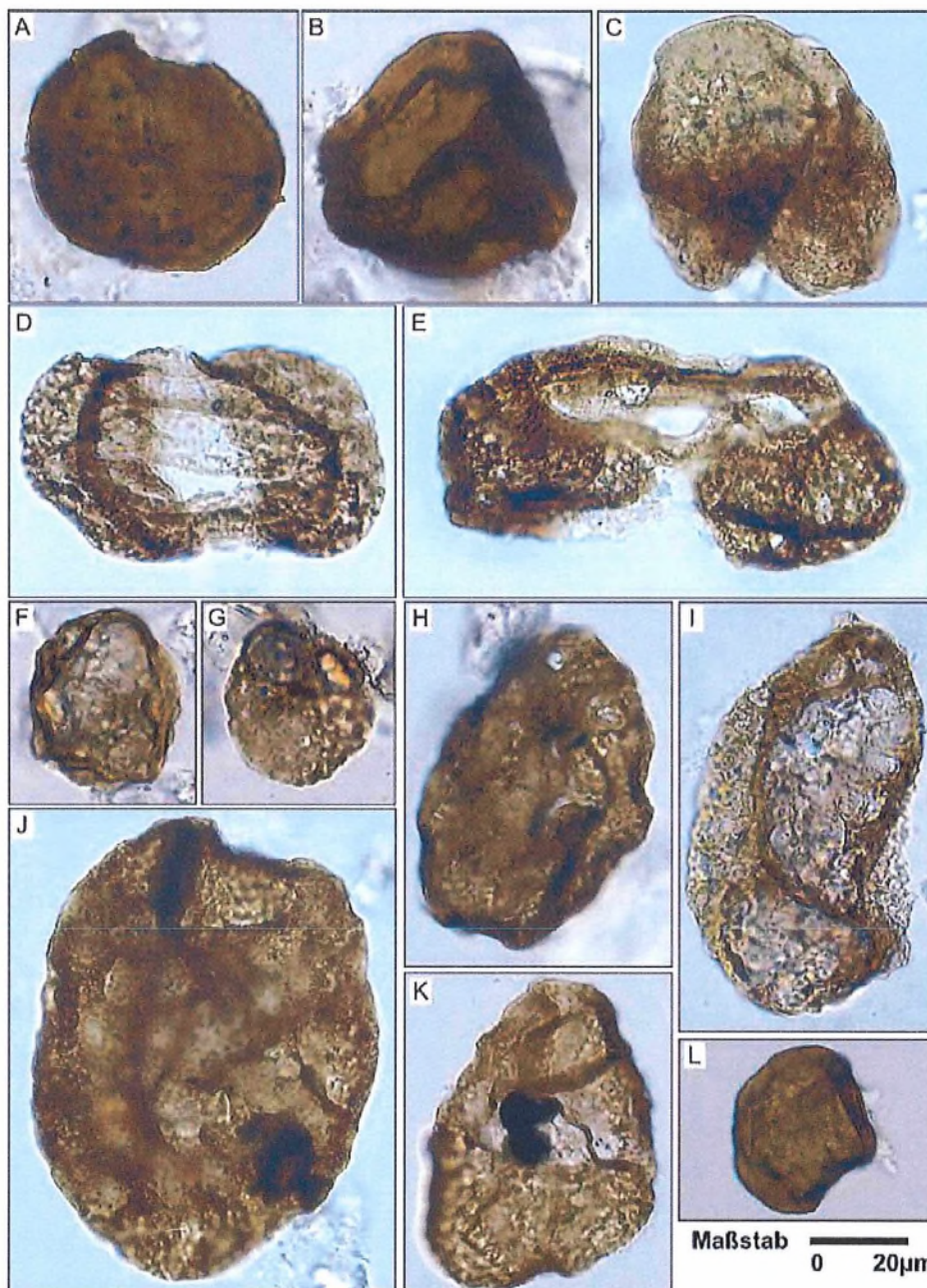


Abb. 2: Pollen, Sporen und Algenzysten aus Probe P84504 bzw. 24As0387: A) *Verrucosisporites* sp. 1, B) cf. *Deltoidospora* sp., C) *Klausipollenites schaubergeri*, D) *Protohaploxypinus pantii*, E) *Protohaploxypinus* sp., F) – L) *Reduviasporonites* spp.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 170

P84503 bzw. 24As0386 (394,55 – 394,57 m)

Eine Probe mit einer Vielzahl an opaken (Abb. 3A, B) und deutlich selteneren durchscheinenden Phytoklasten. Pollen oder Sporen konnten dagegen nicht nachgewiesen werden. Allerdings kommen in der Probe häufig kleine rundliche Zellen mit Durchmessern von unter 20 µm bis 50 µm vor, die vermutlich zu Zellfäden von *Reduviasporonites* (Abb. 3C, D, F) gehören. Im Vergleich mit den Formen aus der *Reduviasporonites*-Gruppe in Probe P84504 bzw. 24As0387 sind die Zysten/Sporen in dieser Probe zum Teil deutlich kleiner und zeigen Ähnlichkeiten zu Pilzsporen. Andere Zellen in der Probe gehören wahrscheinlich zu Grünalgen (*Syndesmorian* sp., Abb. 3E). Auch diese sind charakteristisch für den basalen Bereich des Buntsandsteins. Es sollte allerdings erwähnt werden, dass im Norddeutschen Becken innerhalb des tieferen Buntsandsteins auch innerhalb der Bernburg- und Volpriehausen-Formationen (oberer Unterer bis unterer Mittlerer Buntsandstein) in bestimmten Abschnitten „Phytoplankton-Horizonte“ auftreten, in denen Pollen und Sporen nahezu fehlen, Grünalgen/Pilzsporen wie *Syndesmorian/Reduviasporonites* dagegen häufig sind (Heunisch & Röhlings 2016, Heunisch & Wierer 2021). Allerdings sind diese Horizonte, die auf salzhaltige Wässer und kurzzeitige marine Verhältnisse hindeuten, vor allem durch das Vorkommen von Acritarchen gekennzeichnet, die in dieser Probe jedoch nicht auftreten, sodass auch diese biostratigraphisch wahrscheinlich in die Calvörde-Formation am Übergang zwischen dem Perm und der Trias (Zonen GTr1/GTr2, Heunisch & Wierer 2021) einzuordnen ist.

Stratigraphische Einstufung: Vermutlich Unterer Buntsandstein (Calvörde-Formation, su; Palynomorphenzone GTr1/GTr2 nach Heunisch (1999) und Heunisch & Wierer (2021))

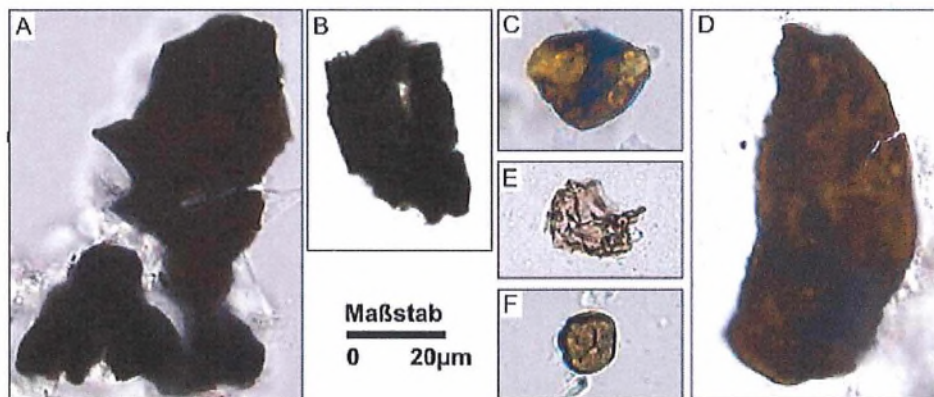


Abb. 3: Phytoklasten und Algenzysten aus Probe P84503 bzw. 24As0386: A), B) Opake Phytoklasten, C), D, F) *Reduviasporonites* spp., E) vermutlich Zelle von *Syndesmorian* cf. *stellatum*

P84501 bzw. 23As0202 (17,53 – 17,55 m)

In der Probe sind eine Reihe von triassischen Palynomorphen in mäßiger bis guter Erhaltung vorhanden. Unter 39 erfassten Palynomorphen in der Probe sind 33 bisaccate Pollen, 1 weiterer Pollen und lediglich 5 Sporen aufgefunden worden. Dies ist ein deutliches Zeichen für eine Pollen-dominierte Flora. Innerhalb des Buntsandsteins war nach dem Perm/Trias-Event die Vegetation zunächst durch Sporen-Pflanzen wie den Farnen dominiert, bis es ab dem höheren Mittleren Buntsandstein zum

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 171

Wechsel von Sporen-dominierten Palynoflorengeellschaften zu Pollen-dominierten Gesellschaften kam, die eine Zunahme von Koniferen in der Vegetation anzeigen (Röhling & Heunisch 2010). Die

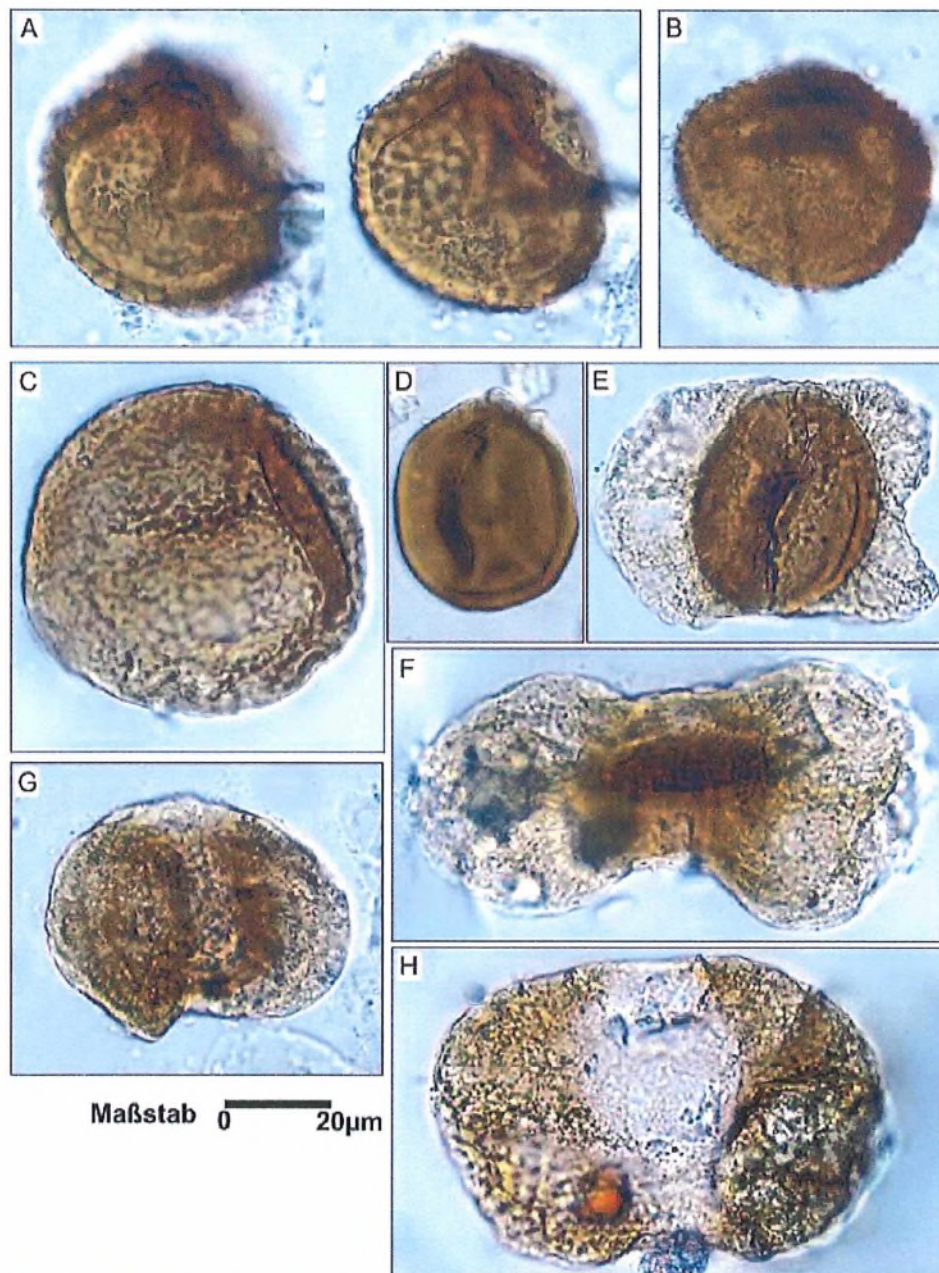


Abb. 4: Pollen und Sporen aus Probe P84501 bzw. 23As0202: A) *Cyclotriletes* sp. 2, B) *Cyclotriletes triassicus*, C) *Guttatisporites* sp., D) *Pretricolpipollenites* sp., E) cf. *Triadispora crassa*, F) *Lunatisporites* sp., G) *Alisporites* cf. *toralis*, H) *Alisporites* sp.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 172

Zusammensetzung der Palynomorphengesellschaft in der Probe zeigt somit, dass dieser Wechsel zur Zeit der Ablagerung des Sediments bereits stattgefunden hatte.

Neben zahlreichen nicht auf Gattungsniveau bestimmbar Pollen kommt unter den bisaccaten Pollen neben *Lunatisporites* sp. (Abb. 4F), *Alisporites* spp. (Abb. 4G, H) oder *Illinites* sp. (Abb. 5F) insbesondere *Voltziaceasporites heteromorphus* (Abb. 5A, B) als dominierendes Element vor. Hinzu treten noch einige Vertreter von *Platysaccus leschikii* (Abb 5C, D), *Microcachrydites* sp. (Abb. 5E) sowie ein Exemplar aus dem *Triadispota*-Formenkreis (Abb 4E) auf.

Unter den Sporen konnten einige Vertreter aus dem Formenkreis *Verrucosisporites/Cyclotriletes/Guttatisporites* (Abb. 4A – C) nachgewiesen werden, wobei die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Gattungen und Arten nicht eindeutig und einheitlich sind (Heunisch 2017). Erwähnenswert ist auch ein Pollen, der drei charakteristische schlitzförmige Öffnungen (Colpen) besitzt und als *Pretricolpipollenites* sp. (Abb. 4D) bezeichnet wird. Der Pollen zeigt Ähnlichkeiten zu der aus dem Oberen Perm bekannten Art *Pretricolpipollenites bharadwaji* (Stephenson & Powell 2013, Tekleva et al. 2019, Zaviolova et al. 2019). Eine ähnliche Form beschreibt auch Heunisch (2017) für den Übergangsbereich vom Mittleren zum Oberen Buntsandstein in der Bohrung Malchin (Mecklenburg-Vorpommern).

Insgesamt deutet das hohe Vorkommen von *V. heteromorphus* zusammen mit dem Auftreten von *P. leschikii* sowie den verschiedenen Sporen-Arten (z.B. *Cyclotriletes* spp.) auf eine Einstufung in Zone GTr6 (Solling-Formation, Mittlerer Buntsandstein) hin (Heunisch 1999, Heunisch & Wierer 2021). Während *P. leschikii* am Ende dieser Zone aussetzt, ist *V. heteromorphus* allerdings auch noch in der nachfolgenden Zone GTr7 (Röt-Formation, oberer Buntsandstein) vertreten. Eine weitere Gattung bisaccater Pollen, die erstmals in der Röt-Formation einsetzt ist *Microcachrydites*. Stratigraphisch relevant ist auch das Erstauftreten von *Triadispota*-Arten. So setzt *T. plicata* erst im Grenzbereich zur Röt-Formation ein, während *T. crassa* bereits in der Solling-Formation regelmäßig vorkommt (Heunisch & Wierer 2021). Das in der Probe gefundene Exemplar von *Triadispota* (Abb. 4E) ist allerdings nicht eindeutig zuzuordnen. Die Probe ist daher biostratigraphisch in den Grenzbereich Mittlerer/Oberer Buntsandstein zu datieren. Allerdings sind möglicherweise auch Umlagerungen aus dem Mittleren Buntsandstein vorhanden, sodass die Probe bereits in die Röt-Formation zu stellen wäre. Dafür würde auch die sehr helle gelbliche Färbung der Palynomorphen sprechen, die nach Heunisch (2017) typisch für die Röt-Formation ist, während eine dunklere Exinenfärbung charakteristisch für die ältere Solling-Formation aus dem Mittleren Buntsandstein ist. Dieses Phänomen wurde in verschiedenen Lokalitäten aus diesem stratigraphischen Niveau in Norddeutschland beobachtet (Heunisch 2017), sodass die helle Färbung der Palynomorphen in dieser Probe durchaus als stratigraphisch relevant angesehen werden könnte.

Stratigraphische Einstufung: Oberer Mittlerer Buntsandstein bis Oberer Buntsandstein (Solling-Formation bis Röt-Formation, smS - so; Palynomorphenzonen GTr6/GTr7 nach Heunisch (1999) und Heunisch & Wierer (2021))

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 173

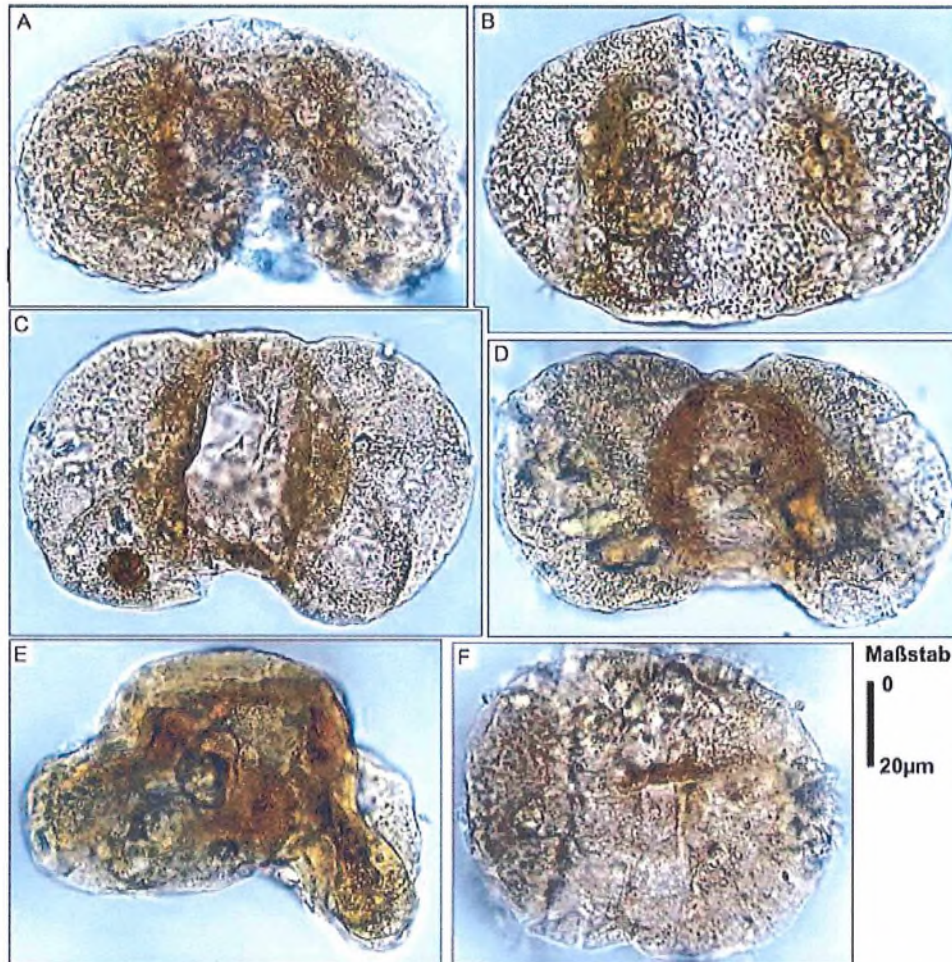


Abb. 5: Weitere Pollen aus Probe P84501 bzw. 23As0202: A) – B) *Voltziaceasporites heteromorphus*, C) – D) *Platysaccus leschikii*, E) *Microcachrydites* sp., F) *Illinites* sp.

P84502 bzw. 23As0217 (6 – 8 m)

In der Probe kommen wenige, dafür aber sehr gut erhaltene Pollen und Sporen vor sowie eine ganze Reihe von bis ca. 100 µm großen abgerundeten opaken Phytoklasten. Unter den Sporen treten neben einigen nicht näher bestimmbar Taxa (Abb. 6C) auch *Densoisporites nejburgii* (Abb. 6B) und *Aratrisporites centratus* (Abb. 6A) vor. *D. nejburgii* ist die charakteristische Form des Mittleren Buntsandsteins (Heunisch & Wierer 2021). Insbesondere in den Volpriehausen- und Detfurth-Formationen ist die Form das dominierende Element, reicht aber noch bis in den Oberen Buntsandstein hinein und verschwindet erst im Laufe der Zone GTr7 (Röt-Formation, Heunisch & Wierer 2021). Das Auftreten der Spore als Einzelexemplar in der Probe deutet daraufhin, dass die Spore kein dominierendes Element in der Probe ist und nur noch selten vorkommt, was auf ein biostratigraphisches Alter ab dem oberen Mittleren Buntsandstein bis maximal Oberer Buntsandstein hindeutet. Mit

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 174

Aratrisporites centratus (Abb. 6A, vgl. Heunisch & Wierer 2021, Taf.2, Fig. 17) kommt jedoch auch eine Spore in der Probe vor, die nach Heunisch & Wierer (2021) erstmals in Zone GTr7 erscheint und nachfolgend die Sporen der Gattung *Densoisporites* ablöst. Ab Zone GTr7 sind diese Sporen dann beständig in Proben aus dem Muschelkalk und Keuper enthalten. Das gemeinsame Auftreten von *D. nejburgii* und *A. centratus* deutet somit auf eine Ablagerung der Probe während des Oberen Buntsandsteins hin. Auch das Auftreten des bisaccaten Pollen *Angustisulcites klausii* (Abb. 6E) spricht nicht gegen dieses Alter, da diese Form erstmals ab dem oberen Mittleren Buntsandstein (Solling-Formation) auftritt (Heunisch & Wiener 2021).

Stratigraphische Einstufung: Vermutlich Oberer Buntsandstein (Röt-Formation, so; Palynomorphenzone GTr7 nach Heunisch (1999) und Heunisch & Wierer (2021))

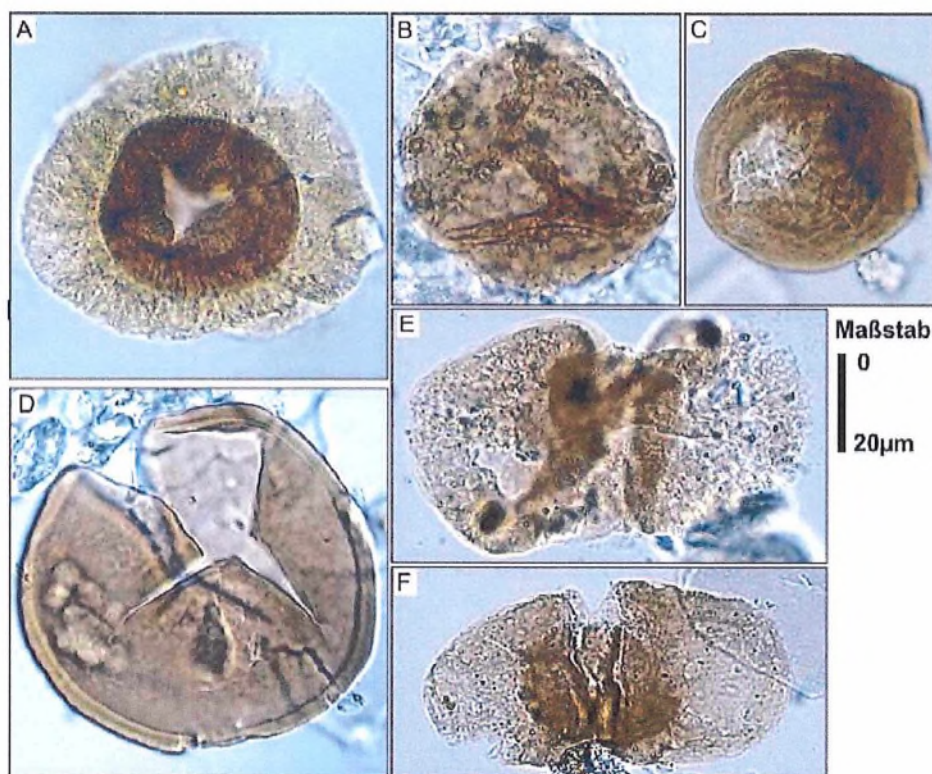


Abb. 6: Pollen und Sporen aus Probe P84502 bzw. 23As0217: A) *Aratrisporites centratus*, B) *Densoisporites nejburgii*, C) trilete Spore, D) *Punctatisporites* sp., E) *Angustisulcites klausii*, F) *Platysaccus* sp.

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 175

Stratigraphische Einstufung

- P84512 bzw. 24As0395 (452,85 – 452,95 m):** Keine biostratigraphische Einstufung möglich
- P84511 bzw. 24As0394 (435,00 – 435,05 m):** Keine biostratigraphische Einstufung möglich
- P84510 bzw. 24As0393 (426,85 – 426,92 m):** Keine biostratigraphische Einstufung möglich
- P84509 bzw. 24As0392 (418,67 – 418,73 m):** Keine biostratigraphische Einstufung möglich
- P84508 bzw. 24As0391 (406,19 – 406,23 m):** Keine biostratigraphische Einstufung möglich
- P84507 bzw. 24As0390 (405,58 – 405,60 m):** Keine biostratigraphische Einstufung möglich
- P84506 bzw. 24As0389 (400,46 – 400,47 m):** Keine biostratigraphische Einstufung möglich
- P84505 bzw. 24As0388 (398,73 – 398,79 m):** Keine biostratigraphische Einstufung möglich
- P84504 bzw. 24As0387 (395,45 – 395,47 m):** Unterer Buntsandstein (Calvörde-Formation, su)
- P84503 bzw. 24As0386 (394,55 – 394,57 m):** Vermutlich Unterer Buntsandstein (Calvörde-Formation, su)
- P84501 bzw. 23As0202 (17,53 – 17,55 m):** Oberster Mittlerer Buntsandstein bis Oberer Buntsandstein (Solling-Formation bis Röt-Formation, smS – so)
- P84502 bzw. 23As0217 (6 – 8 m):** Vermutlich Oberer Buntsandstein (Röt-Formation, so)

Literatur

- Backhaus, E., Hagdorn, H., Heunisch, C., & Schulz, E. (2014). Biostratigraphische Gliederungsmöglichkeiten des Buntsandstein. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: J. Lepper & H.-G. Röhling für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 69, 151-164.
- Fijalkowska-Mader, A. (2013). Palynostratigraphy, palaeoecology and palaeoclimate of the Late Permian and Triassic of the Nida Basin. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 454, 15-70.
- Heunisch, C. (1999). Die Bedeutung der Palynologie für Biostratigraphie und Fazies in der Germanischen Trias. *Trias, eine ganz andere Welt*, 207-220.
- Heunisch, C. (2010): Mikropaläontologischer Untersuchungsbericht. – Interner LBEG-Bericht 2004_3466 zur Bohrung Remlingen 5; Hannover.
- Heunisch, C. (2012): Mikropaläontologischer Untersuchungsbericht. – Interner LBEG-Bericht 4852_6452 zu Aufschlussproben Schöppenstedt; Hannover.
- Heunisch, C. (2015a): Palynologischer Untersuchungsbericht. – LBEG-Bericht 6897_8445 zur Bohrung H17, Projekt 10-022 „Stilllegung Asse“; Hannover.
- Heunisch, C. (2015b): Palynologischer Untersuchungsbericht. – LBEG-Bericht 6898_8444 zur Bohrung R9, Projekt 10-022 „Stilllegung Asse“; Hannover.
- Heunisch, C. (2015c): Palynologischer Untersuchungsbericht von 20 Proben der Bohrung Remlingen 5. – LBEG-Bericht 7911_8478; Hannover.
- Heunisch, C. (2017): Palynologischer Untersuchungsbericht der Kernbohrung Malchin-5/5H, TK 2241

Erkundungsbohrung R18 – Geowissenschaftlicher Ergebnisbericht



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	55211000	GEO			HA	BW	0009	00

Blatt: 176

Teterow, MV. – Interner LBEG-Bericht 8017_9864; Hannover.

Heunisch, C. (2019): Palynologischer Untersuchungsbericht der Kernbohrung Schlepzig 2/65. – LBEG-Bericht 13382_15269; Hannover.

Heunisch, C., & Röhling, H. G. (2016). Early Triassic phytoplankton episodes in the lower and middle Buntsandstein of the Central European Basin. *Z. Dt. Ges. Geowiss*, 167(2-3), 227-248.

Heunisch, C., & Wierer, F. (2021). Palynomorphe der Germanischen Trias. Trias–Aufbruch in das Erdmittelalter. Pfeil, Munich, 205-217.

Moss, P. (2013). Palynology and its application to geomorphology. In: Shroder, J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, pp. 315–325.

Rampino, M. R., & Eshet, Y. (2018). The fungal and acritarch events as time markers for the latest Permian mass extinction: An update. *Geoscience Frontiers*, 9(1), 147-154.

Röhling, H. G., & Heunisch, C. (2010). Der Buntsandstein. Eine lebensfeindliche Wüste oder doch mehr?. *Biologie in unserer Zeit*, 40: 268-276.

Stephenson, M. H., & Powell, J. H. (2013). Palynology and alluvial architecture in the Permian Umm Irma Formation, Dead Sea, Jordan. *GeoArabia*, 18(3), 17-60.

Tekleva, M. V., Stephenson, M. H., & Zaviolova, N. E. (2019). The exine ultrastructure of *Retricolpitenites bharadwajii* from the Permian of Jordan. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 268, 19-28.

Visscher, H., Sephton, M. A., & Looy, C. V. (2011). Fungal virulence at the time of the end-Permian biosphere crisis?. *Geology*, 39(9), 883-886.

Zaviolova, N., Tekleva, M., & Stephenson, M. (2019). The Permian through the eyes of pollen morphologists. *Change*, 105, 21-35.

