

Projekt Gorleben

9GE431100000

Geotechnische Bewertung
der Erkundungsbereiche:
Permeabilitätsmessungen



Ergebnisbericht

Hannover, April 2014

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Projekt Gorleben

Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche:
Permeabilitätsmessungen

Ergebnisbericht

Autoren: Shao, Hua, Dr.
Paul, Benjamin
Hesser, Jürgen, Dr.

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz

Auftragsnummer: 9GE431100000

Geschäftszeichen: B3.4/B50123-25/2014-0003/001

Datum: 16.04.2014

TK-Nummer: 2934 (Lenzen)

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

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

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	4
1 Vorgang.....	5
2 Einleitung.....	5
3 Erkundungsziel der felshydraulischen Untersuchungen.....	6
4 Konzept zur hydraulischen Charakterisierung in der Weitererkundungsphase.....	7
4.1 Ist-Bestands-Analyse.....	7
4.2 Untersuchungsschwerpunkte und -lokationen.....	7
5 Permeabilität im unverritzten Salzgestein (Fernfeld).....	9
5.1 Staßfurt-Folge (z2).....	10
5.1.1 Hauptsalz (z2HS1/z2HS2/z2HS3).....	10
5.1.2 Sonstige stratigraphische Einheiten der Staßfurt-Folge.....	11
5.2 Leine-Folge (z3).....	12
5.2.1 Hauptanhydrit (z3HA).....	12
5.2.2 Liniensalz (z3LS) und Basissalz (z3BS).....	13
5.2.3 Grauer Salzton (z3GT).....	14
5.3 Übergang z2/z3.....	14
5.4 Gorleben-Bank (z3OSM) und Orangesalz (z3OS).....	14
5.5 Bewertung und Diskussion der Permeabilität im unverritzten Salzgestein.....	16
6 Nahfeldmessungen auf der 840-m-Sohle.....	18
6.1 Permeabilitätsmessungen in den KW-Kurzbohrungen im Querschlag 1 West.....	19
6.2 Permeabilitätsmessungen in den KW-Kurzbohrungen im Querschlag 1 Ost.....	20
6.3 Messungen in KW-imprägnierten Bereichen.....	23
6.4 Wiederholungsmessungen im Nahfeld.....	24
6.5 Bewertung und Diskussion der Permeabilität im Nahfeld (840-m-Sohle).....	24
7 Quantifizierung von KW-Vorkommen.....	25
7.1 Klassifizierung der KW-Packerbohrungen anhand der Druckaufbaumessungen.....	27
7.2 Gasvolumenbestimmung und Bestimmung des Einflussbereichs im Gebirge.....	28
7.3 Quantifizierung der KW-Zutrittsraten.....	30
7.4 Isoliertheit / Konnektivität.....	30

	Seite
8 Zusammenfassung.....	32
Literaturverzeichnis.....	36
Abkürzungsverzeichnis.....	38
Tabellenverzeichnis.....	40
Abbildungsverzeichnis.....	41

Gesamtblattzahl: 41

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Shao, Hua, Dr. Paul, Benjamin Hesser, Jürgen, Dr.
Titel:	Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche: Permeabilitätsmessungen
Schlagwörter:	Auflockerungszone, Erkundungsbereich, Gorleben, Gorleben-Bank, Hauptsalz, Kohlenwasserstoff, Permeabilität

Im Erkundungsbergwerk Gorleben wurden Permeabilitätsmessungen in den geologischen Erkundungsbohrungen, in den Gorleben-Bank-Bohrungen und in den Kohlenwasserstoff-Kurzbohrungen im Nahfeld von Oktober 2010 bis November 2012 durchgeführt. Zusätzlich sind Druckaufbaumessungen in 20 Kohlenwasserstoff-Packerbohrungen durchgeführt worden. Die Messungen lieferten Permeabilitätsobergrenzen von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ für die Schichten der Staßfurt-Folge (z2) und Leine-Folge (z3). Abweichend davon wurde bei je einer Messung im Hangendsalz (z2HG) und im Kaliflöz Staßfurt (z2SF) eine Permeabilität von ca. 10^{-17} m^2 bzw. 10^{-16} m^2 sowie bei der Messung im Grauen Salzton (z3GT) und im Hauptanhydrit (z3HA) von 10^{-19} m^2 bestimmt.

Die Messungen in den Gorleben-Bank-Bohrungen im Orangesalz (z2OS) ergaben Permeabilitätsobergrenzen von $< 10^{-20} \text{ m}^2$. Nur in einer Bohrung wurde ein geringfügiger Lösungszutritt beobachtet.

Im unmittelbaren Nahfeld des Querschlages (einige Dezimeter vom Stoß) sind um mehrere Größenordnungen erhöhte Permeabilitäten bestimmt worden. Mit zunehmendem Abstand vom Stoß nimmt die Permeabilität tendenziell, aber unstetig ab. Anhand der Messergebnisse kann der ungestörte Bereich ab einer Entfernung von rund 2,5 m vom Stoß angenommen werden.

Basierend auf den Messergebnissen der KW-Packerbohrungen auf der 840-m-Sohle kann noch keine Aussage über das Gesamtvolumen der dort aufgeschlossenen Kohlenwasserstoff-Vorkommen getroffen werden. Nach mehr als zwei Jahren werden in drei Bohrungen immer noch signifikante Zutritte gemessen. Die bislang erzielten Ergebnisse lassen auf lokal isolierte Kohlenwasserstoff-Vorkommen schließen.

1 Vorgang

Im Zuge der Weitererkundung des Salzstocks Gorleben hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die Bearbeitung des Arbeitspaketes 9GE431100000 *Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche* übertragen. Mit dem hier vorgelegten Bericht werden die von Oktober 2010 bis November 2012 durchgeführten geowissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnisse dokumentiert.

2 Einleitung

Für die geotechnischen Untersuchungen bei der untertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben wurde durch die BGR zusammen mit dem BfS in Abstimmung mit der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) ein Erkundungsprogramm erarbeitet. Dieses Programm sieht die Durchführung von geomechanischen und felshydraulischen Labor- und In-situ-Untersuchungen, geophysikalischen Untersuchungen sowie Überwachungsmessungen vor.

Für die felshydraulischen In-situ-Untersuchungen wurden bereits vor dem Moratorium im Rahmen des Arbeitspakets 9G41511 0000 Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben folgende Fragestellungen bearbeitet:

- die Permeabilität im dichten Salzgebirge,
- die Auflockerungsbereiche um die Strecke,
- die hydraulische Charakterisierung des Anhydrits und
- die Charakterisierung der Lösungs- und Gasreservoirs.

Die Arbeit wurde von 2000 bis 2010 unterbrochen (Erkundungsmoratorium). Die bis zum Beginn des Moratoriums erarbeiteten Ergebnisse wurden in einem Abschlussbericht (NOWAK & WEBER 2002) dokumentiert.

Mit der Wiederaufnahme der Erkundungsarbeit im Jahr 2010 wurde ein Konzept zur geotechnischen Bewertung der Erkundungsbereiche im Rahmen des Arbeitspaketes 9G E431100000 entwickelt. In diesem Konzept wurde eine Mindestanforderung an die Anzahl der hydraulischen Messungen im Hinblick auf eine Eignungsaussage festgelegt. Auf Erlass des Bundesumweltministeriums wurden die Erkundungsarbeiten im November 2012 gestoppt.

Der vorliegende Ergebnisbericht fasst die bislang erzielten Ergebnisse zu den Permeabilitätsmessungen im Nah- und Fernfeld, in der Gorleben-Bank sowie den Druckaufbaumessungen in den KW-Packerbohrungen zusammen. Unter Fernfeld sind Gebirgsbereiche zu verstehen, in denen keine Beeinflussung durch Grubenräume zu erwarten sind.

3 Erkundungsziel der felshydraulischen Untersuchungen

Die Barrierewirkung von Salzstrukturen ist auf das nahezu vollständige Fehlen vernetzter Porenraumssysteme zurückzuführen. Lokal begrenzt können vernetzte Poren und (Mikro-) Klüfte vorkommen. Da anhydritische Gesteine hingegen häufig geklüftet sind, muss die Isolation des Anhydrits gegenüber potentiellen Einlagerungsbereichen belegt sein. Folglich fließt in die Bewertung des Salzstocks Gorleben die räumliche Verteilung von dichtem Salzgebirge, darin auftretenden Auflockerungsbereichen und geklüftetem Anhydrit sowie die Lage und Ausdehnung von Lösungs- und Gasreservoirs ein, die durch hydraulische In-situ-Untersuchungen zu identifizieren und zu charakterisieren sind.

Diese hydraulischen In-situ-Untersuchungen finden in unterschiedlichen stratigraphischen Einheiten und Tiefenbereichen mit unterschiedlichen, an die Fragestellung sowie an die Bohrlochlängen und -durchmesser angepassten Messausrüstungen statt. In langen geologischen Erkundungsbohrungen, in denen keine Beeinflussung durch Grubenräume erwartet wird, werden Messungen zur hydraulischen Charakterisierung des Salzgebirges durchgeführt (Fernfeldmessungen). Dabei wird die Gorleben-Bank (z3OSM), die überwiegend aus Anhydrit mit einer dünnen Tonschicht besteht und mit einer Mächtigkeit von Zentimetern bis wenige Dezimeter in das Orangesalz eingebettet ist (vgl. BORNEMANN et al. 2003 und BÄUERLE et al. 2000), gesondert betrachtet. Zur Charakterisierung potentieller Auflockerungsbereiche um Grubenräume werden Messungen in Kurzbohrungen ausgeführt (Nahfeldmessungen). Zur Größenabschätzung von Kohlenwasserstoff-Vorkommen und zur Quantifizierung von Zutrittsraten und -mengen wurden Druckaufbaumessungen in mittels Einfachpackersystemen verschlossenen KW-Packerbohrungen durchgeführt sowie die sich im Messintervall ansammelnden Gase und Kondensate nach Menge und Zusammensetzung beprobt.

Das für Gorleben entwickelte Konzept der hydraulischen Bohrlochmessungen ist erstmals in WEBER (1999) beschrieben. Ergebnisse aus vorausgegangenen Bohrlochmessungen (NOWAK & WEBER 2002) und Ergebnisse aus nach dem Moratorium durchgeführten Messungen (ZARETZKI et al. 2012, ZARETZKI et al. 2013) sind die Grundlagen des vorliegenden Berichts.

4 Konzept zur hydraulischen Charakterisierung in der Weitererkundungsphase

4.1 Ist-Bestands-Analyse

Nach dem zehnjährigen Moratorium erfolgte vor der Wiederaufnahme der Erkundungsarbeiten zunächst eine Analyse des Ist-Bestandes der im Rahmen der hydraulischen Charakterisierung bis zum Moratorium durchgeführten Arbeiten. Bis zum Jahr 2000 wurden Permeabilitätsuntersuchungen in folgenden geologischen Erkundungsbohrungen durchgeführt:

- 02YEQ01 RB427 im Erkundungsbereich 1 (kurz: EB1) sowie,
- 01YEF20 RB217 und 02YEQ01 RB194 im Infrastrukturbereich.

Die Messungen wurden ausschließlich im Streifensalz (z2HS2), in der Leine-Folge (z3) und im Übergang Staßfurt-/Leine-Folge (z2/z3) durchgeführt. Die gemessene Permeabilität des Hauptsalzes liegt bei $<10^{-20}$ m². Bis zum Moratorium wurden im Knäuelsalz (z2HS1) und im Kristallbrockensalz (z2HS3) im Erkundungsbereich keine Messungen durchgeführt.

Die Permeabilität in den Auflockerungsbereichen wurde in zwei Kurzbohrungen in der Richtstrecke 3 Ost bestimmt. Die gemessenen Permeabilitäten betragen in Stoßentfernungen von 0,3 m bis 1,2 m zwischen 5×10^{-22} m² und 10^{-20} m².

Nach NOWAK & WEBER (2002) wurden nennenswerte Lösungs- und Gasvorkommen im Zechstein 3 und an der Grenze Zechstein 3 zu Zechstein 2 lokalisiert. Feuchtstellen und nicht messbare Zutritte wurden im Zechstein 2 identifiziert.

4.2 Untersuchungsschwerpunkte und -lokationen

Die bisherigen Untersuchungsziele der Permeabilitätsbestimmung unterschiedlicher stratigraphischer Einheiten im ungestörten Gebirgsbereich und der Charakterisierung des Nahfeldes wurden seit Wiederaufnahme der Erkundungsarbeiten auf Untersuchungen von Kohlenwasserstoff-Vorkommen erweitert. Gleichzeitig sind die Untersuchungen im Übergangsbereich z2/z3 und in der Gorleben-Bank (z3OSM) verstärkt worden.

Für die Eignungsaussage des Salzstocks sind die Permeabilitäten der barrierelevanten stratigraphischen Einheiten zu bestimmen. Um die Kennwertänderungen für die jeweilige stratigraphische Einheit zu identifizieren und die geologischen oder anthropogenen Ursachen zu bestimmen, wurden Mindestanforderungen an die Anzahl der Messungen gestellt.

Dabei sind Messungen in verschiedenen Bohrungen mit unterschiedlicher Orientierung für die jeweilige Stratigraphie durchgeführt worden. Voraussetzung für die Festlegung der Bohr- und Messlokationen sowie der Bohrungsorientierungen sind die Befunde aus den geologischen Erkundungsbohrungen.

Zur Bestimmung der Permeabilitätsverteilung im Nahfeld wurden Permeabilitätsmessungen in bis zu sechs Meter langen Kurzbohrungen durchgeführt. Die Anordnung und Lokation der Bohrungen wurde entsprechend den geologischen Gegebenheiten, der Streckengeometrie und den geomechanischen Beobachtungen festgelegt. Als mögliche Testlokationen waren das Streifensalz (z2HS2) im Querschlag 1 West und in der nördlichen Richtstrecke sowie das Knäuelsalz (z2HS1) im Querschlag 1 Ost und in der Erkundungslokation 4 (kurz: EL4) geplant. Aufgrund von Feuchtstellen und erhöhten Konvergenzen in der EL4 sollten die horizontalen und vertikalen Kurzbohrungen eine Länge von zehn Metern aufweisen.

Im Salzstock Gorleben wurden flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe bei Streckenauffahrungen und Bohrungen angetroffen. Die Untersuchungen zur Verteilung und zur Größe dieser KW-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben sind ein Schwerpunkt der Erkundungsarbeiten. Im Rahmen des Arbeitspaketes 9GE431100000 *Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche* wurden In-situ-Instrumentierungen von Einfachpackersystemen zur Quantifizierung der KW-Zutrittsraten und für die Gewinnung von gasförmigen und flüssigen KW-Proben für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der KW vorgesehen.

In der Gorleben-Bank (Mittleres Orangesalz) wurden Feuchtstellen und Lösungszutritte mit einem Zutrittsvolumen von bis zu einigen Kubikmetern (NOWAK & WEBER 2002) festgestellt. Zur Bestimmung der Durchlässigkeit der Gorleben-Bank im ungestörten Gebirgsbereich wurden zusätzliche Messungen eingeplant.

Die Untersuchungslokationen auf der 840-m-Sohle sind in Abb. 1 dargestellt.

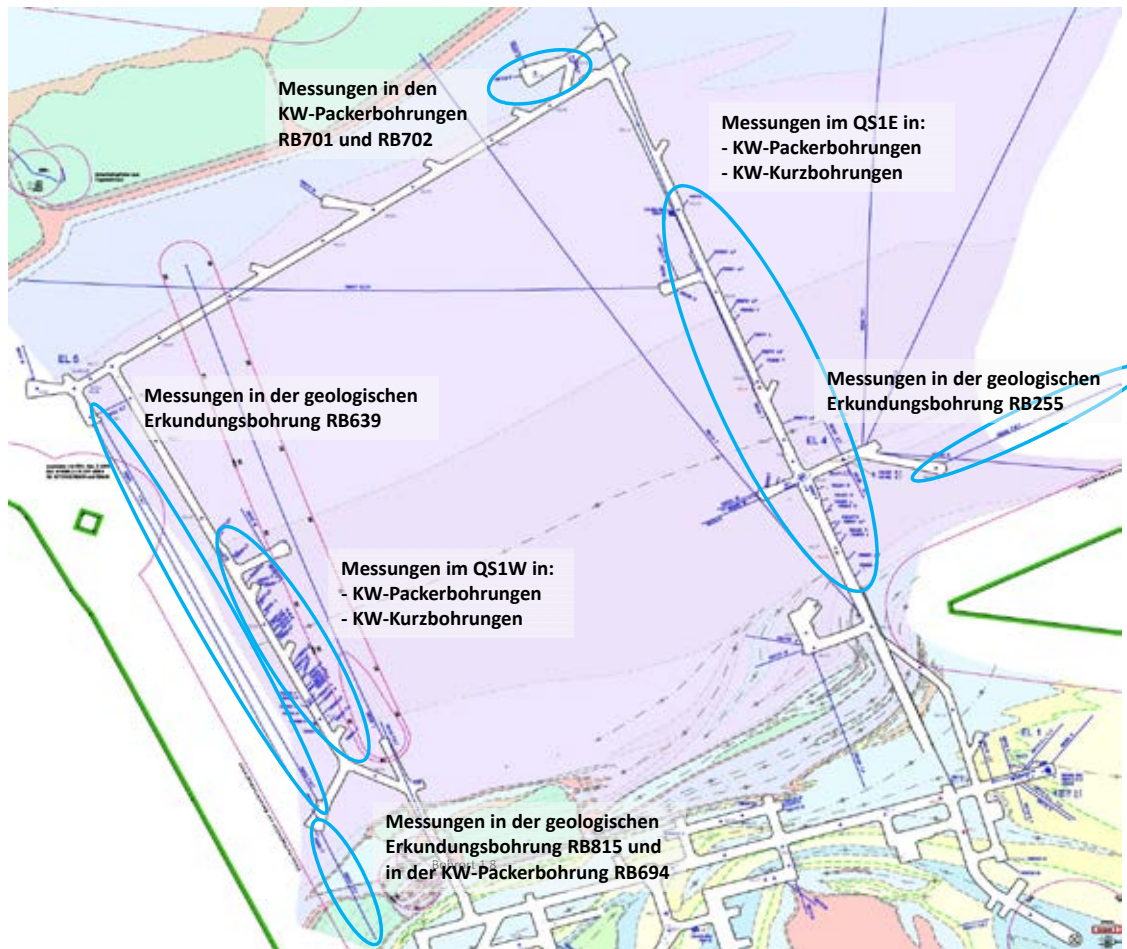


Abb. 1: Lage der geologischen Erkundungsbohrungen RB639, RB815 und RB255 sowie des Querschlags 1 West und Querschlags 1 Ost mit Bohrrort 5 im Sohlriss der 840-m-Sohle (PAUL et al. 2013)

5 Permeabilität im unverritzten Salzgestein (Fernfeld)

Auf den Erkundungssohlen im Salzstock Gorleben wurden verschiedene stratigraphische Einheiten aufgeschlossen, welche der Staßfurt- und Leine-Folge zuzuordnen sind. Die wichtigsten stratigraphischen Einheiten im Standort Gorleben sind in Tab. 1 aufgelistet. Im EB1 kommt überwiegend das Hauptsalz (z2HS), bestehend aus Knäuelsalz (z2HS1), Streifensalz (z2HS2) und Kristallbrockensalz (z2HS3), vor. Tab. 1 gibt einen Überblick über die Anzahl und Testmeter der Permeabilitätsmessungen in den entsprechenden stratigraphischen Einheiten.

Tab. 1: Übersicht zu den stratigraphischen Einheiten, in denen Permeabilitätsmessungen durchgeführt wurden

	Stratigraphie		Anzahl der Messungen/ Testmeter
Staßfurt-Folge	z2HS1	Knäuelsalz	12/12
	z2HS2	Streifensalz	16/29,8
	z2HS3	Kristallbrockensalz	4/4,4
	z2HG	Hangendsalz	8/4,4
	z2SF	Kaliflöz Staßfurt	11/8,6
	z2UE	Kies. Übergangsschicht	6/1,5
Leine-Folge	z3HA	Hauptanhydrit	3/2,4
	z3GT	Grauer Salzton	1/1,2
	z3BS/LS	Basissalz/Liniensalz	11/16,4
	z3BK/BD	Bank/Bändersalz	1/1,2
	z3OSO/OSM/OSU	Oberes/Mittleres/ Unteres Orangesalz	21/28
z2/z3	z2SF/z3HA	Übergang z2/z3	1/1,2
	z2SF/z3BS		1/1,2

5.1 Staßfurt-Folge (z2)

5.1.1 Hauptsalz (z2HS1/z2HS2/z2HS3)

Insgesamt wurden 12 Messungen mit einer kumulativen Messlänge von 12 m im Knäuelsalz (z2HS1) durchgeführt. Die Messungen erfolgten hauptsächlich in den Bohrungen 02YEQ02 RB639 und 02YER20 RB255, welche in den Jahren 2011 und 2012 gestoßen wurden. Die Festlegung der Messintervalle erfolgte anhand der Begutachtung der Bohrkern in unterschiedlichen Bohrungstiefen. Alle Messungen lieferten Permeabilitäten $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$.

Im Streifensalz (z2HS2) wurden 16 Messungen mit einer kumulativen Messlänge von 29,8 m durchgeführt. Davon erfolgten 12 Messungen in den Bohrungen 02YEQ01 RB427 und 02YEQ01 RB194 und 4 Messungen in den Bohrungen 02YEQ02 RB639 und 01YEA02 RB132. Die ermittelten Permeabilitäten in den untersuchten Gebirgsbereichen sind kleiner als 10^{-20} m^2 .

Mit drei Messungen in zwei Lokationen wurde der Übergangsbereich zwischen Knäuelsalz und Streifensalz in der Bohrung 02YEQ02 RB639 untersucht. Der Übergangsbereich

zwischen beiden stratigraphischen Einheiten anhand der geologischen Kernbeschreibung war fließend. Eine klare Trennung zwischen beiden Einheiten war daher nicht möglich. Die gemessene Permeabilität im Übergangsbereich in der Bohrung 02YEQ02 RB639 ist kleiner als 10^{-20} m^2 .

Im Kristallbrockensalz (z2HS3) wurden insgesamt vier Permeabilitätsmessungen durchgeführt. In der Bohrung 02YEQ01 RB194 wurden zwei Messungen mit Lauge als Injektionsmedium durchgeführt und dabei eine Permeabilität von $5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt, dabei kann ein Messartefakt nicht ausgeschlossen werden (NOWAK & WEBER 2002). In der Bohrung 02YEQ02 RB815 erfolgten zwei Messungen, bei denen Stickstoff als Injektionsmedium verwendet wurde. Die ermittelte Permeabilität des Kristallbrockensalzes in der Bohrung 02YEQ02 RB815 ist kleiner als 10^{-20} m^2 .

Alle langen geologischen Erkundungsbohrungen, in denen Permeabilitätsmessungen durchgeführt wurden, fallen, mit Ausnahme der 02YEQ02 RB639, welche von Bohrort 1.2 mit 2 gon steigend in Richtung Bohrort 5 gestoßen wurde, mit 1 gon ein. Bohrungen für die Permeabilitätsbestimmung in tiefer gelegenen Bereichen waren geplant, wurden aber bis zum Erkundungsstopp nicht abgeteuft. Daher waren keine Messungen in solchen Bohrungen möglich.

5.1.2 Sonstige stratigraphische Einheiten der Staßfurt-Folge

Das Hangendsalz der Staßfurt-Folge (z2HG) tritt häufig nur vereinzelt mit einer Mächtigkeit von mehreren Zentimetern auf. Selten treten mehrere Meter mächtige Ausbildungen auf. Aus diesem Grund wurden in der Bohrung 02YEQ02 RB815 gezielt Messungen in den aufgeschlossenen Schichten des Hangendsalzes zwischen 25,4 und 30,95 m (entspricht einer Mächtigkeit von 5,45 m) durchgeführt. Für das hellgraue Steinsalz mit einer Kristallgröße von 5 bis 12 mm wurde in einer Bohrungstiefe von 27 m eine Permeabilität von 10^{-17} m^2 ermittelt. Ein technischer Fehler kann als Ursache für diese vergleichsweise hohe Permeabilität ausgeschlossen werden, da eine Wiederholungsmessung das Ergebnis bestätigte. Für zwei weitere Messungen in demselben Vorkommen und für die Messungen in angrenzenden stratigraphischen Einheiten (Kristallbrockensalz (z2HS3) und Kieseritische Übergangsschichten (z2UE)) wurden geringere Permeabilitäten mit Werten $< 10^{-20} \text{ m}^2$ gemessen. Die vergleichsweise hohe Permeabilität für das Hangendsalz in einer Bohrungstiefe von 27 m ist daher als lokal begrenzter Einzelwert zu betrachten.

In den mehrere Meter mächtigen Hangendsalzschieben kann die Permeabilität aufgrund des Vorhandenseins des spröden Anhydrits bis zu 10^{-17} m^2 betragen. Der Randbereich des Vorkommens ist in der Regel jedoch gut verheilt und weist keine erhöhte Permeabilität auf.

In der Bohrung 02YEQ01 RB194 wurde eine Permeabilitätsmessung mit Lauge als Injektionsmedium durchgeführt. Mit der Messung wurden die Kieseritischen Übergangsschichten (z2UE) und das Hangendsalz (z2HG) in einem ein Meter langen Messintervall erfasst. Basierend auf den Messdaten wurde für diesen Messbereich eine Permeabilität von $5 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ ermittelt. Eine vergleichbare Messung wurde zwischen 77,0 m und 78,2 m durchgeführt, die das Hangendsalz (z2HG), die Kieseritischen Übergangsschichten (z2UE) und das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) erfasste. Die für dieses Messintervall ermittelte Permeabilität beträgt $< 10^{-20} \text{ m}^2$.

Zur hydraulischen Charakterisierung der Kieseritischen Übergangsschichten (z2UE) wurden Messungen in der Bohrung 02YEQ02 RB815 durchgeführt. Aufgrund der geringen Mächtigkeit der Kieseritischen Übergangsschichten von rund 0,5 m wurden bei den Permeabilitätsmessungen auch die angrenzenden Salzsichten (Hangendsalz (z2HG) und/oder das Kaliflöz Staßfurt (z2SF)) erfasst. Bislang wurde keine Permeabilität höher als 10^{-20} m^2 gemessen.

Das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) kommt mit geringer Mächtigkeit von weniger als 0,5 m bis zu 3 m Mächtigkeit vor. Bei der geringmächtigen Ausbildung des teilweise auch vertaubten Kaliflözes werden auch angrenzende stratigraphische Einheiten bei den Messungen mit erfasst. Die Permeabilitäten (02YEQ02 RB815, von 77,0 bis 78,2 m) wurden mit $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt. In der Ausbildungsform als Trümmercarnallitit wurden vier Messungen durchgeführt. Für zwei Messungen in den Bohrungen 01YEF20 RB217 und 02YEQ01 RB194 sowie für eine Messung in der Bohrung 02YEQ02 RB815 wurden Permeabilitäten von $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt. In der Bohrung 01YEA02 RB132 wurde im Intervall zwischen 68,0 m und 69,2 m eine Permeabilität $\leq 10^{-16} \text{ m}^2$ bestimmt. An dieser Stelle betrug die Mächtigkeit des Kaliflöz Staßfurt 5,6 m. Durch eine Wiederholungsmessung nach wenigen Stunden wurde das Messergebnis bestätigt.

Der Deckanhydrit (z2DA) und das Decksteinsalz (z2DS) wurden in den bislang erstellten geologischen Erkundungsbohrungen nicht erbohrt. Aufgrund fehlender Messungen kann daher keine Aussage zu den Permeabilitäten dieser salinaren Schichten gemacht werden.

5.2 Leine-Folge (z3)

5.2.1 Hauptanhydrit (z3HA)

Bei den Messungen in der Leine-Folge wurde dem Hauptanhydrit besondere Bedeutung zugemessen (ZARETZKI et al. 2012). Der Hauptanhydrit (z3HA) wurde in den Bohrungen 01YEA02 RB132 und 02YEQ02 RB815 (Abb. 2) auf der 820- bzw. 840-m-Sohle erbohrt.

Die Mächtigkeit des erbohrten Hauptanhydrits beträgt ca. 40 m in der Bohrung RB132 und ca. 2 m in der Bohrung 02YEQ02 RB815. Zur Bestimmung der Permeabilität des Hauptanhydrits wurden drei Messungen durchgeführt, wobei eine Messung in der Bohrung 02YEQ02 RB815 neben dem Hauptanhydrit auch das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) erfasst hat. Während in der Bohrung 02YEQ02 RB815 eine Permeabilität von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ gemessen wurde, wurde in der Bohrung RB132 eine geringfügig erhöhte Permeabilität von $< 10^{-19} \text{ m}^2$ ermittelt. Die Begutachtung der Bohrkerns zeigte keine außergewöhnliche Ausbildung des Hauptanhydrits im Bereich des Messintervalls.

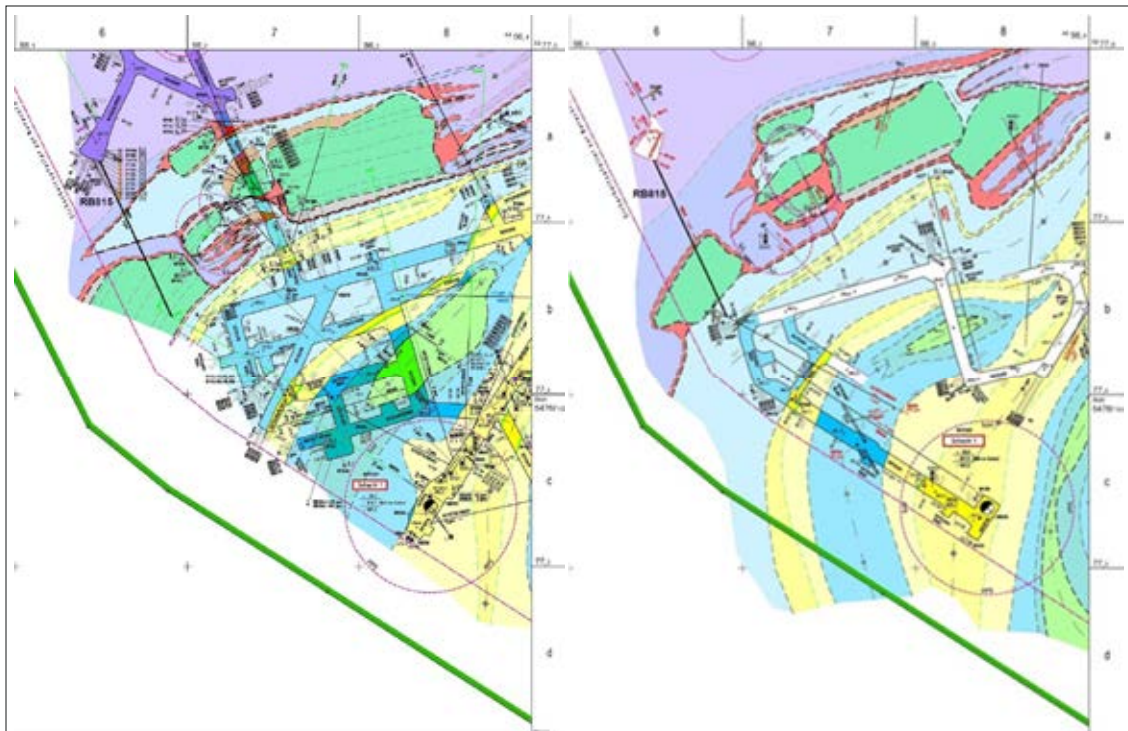


Abb. 2: Lage der Bohrung 02YEQ02 RB815 auf der 840-m-Sohle (links) und auf der 880-m-Sohle (rechts) (DBE 2012)

5.2.2 Liniensalz (z3LS) und Basissalz (z3BS)

In den Bohrungen 01YEF20 RB217 und 02YEQ01 RB194 wurden drei Messungen im Liniensalz (z3LS) mit einer kumulativen Messlänge von 7,4 m durchgeführt. Die auf Grundlage der Messdaten ermittelten Permeabilitäten für die Messintervalle im Liniensalz betragen $\leq 10^{-19} \text{ m}^2$. In der Bohrung 02YEQ02 RB815, zwischen 44,7 und 45,9 m, wurde eine geringere Permeabilität von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt. In den Messintervallen mit einer Wechsellagerung von Linien- und Basissalz wurden ebenfalls geringere Permeabilitäten von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt.

Das Basissalz (z3BS) wurde in den Bohrungen 01YEF20 RB217, 02YEQ01 RB194, 02YEQ02 RB815 und 01YEA02 RB132 aufgeschlossen. Es wurden je eine Messung in den Bohrungen 02YEQ01 RB194 und 01YEF20 RB217 sowie je zwei Messungen in den Bohrungen 01YEA02 RB132 und 02YEQ02 RB815 durchgeführt. Für alle Messungen wurden Permeabilitäten $< 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt. Bei einer Druckaufbaumessung in der Bohrung 02YEQ02 RB815 in einer Messtiefe von 37,8 m bis 39,0 m wurde ein geringfügiger Druckanstieg von bis zu 1,6 bar innerhalb weniger Stunden gemessen. Anschließend fiel der Druck bis auf 1,2 bar kontinuierlich ab.

5.2.3 Grauer Salzton (z3GT)

Der Graue Salzton (z3GT) wurde nur in Bohrung 01YEA02 RB132 in einer Bohrungstiefe zwischen rund 12 m und 15,3 m angetroffen. Die gemessene Permeabilität von 10^{-19} m^2 ist laut Kernbeschreibung der DBE vermutlich auf das Vorhandensein von mit Carnallit und Steinsalz gefüllten Klüften zurückzuführen.

5.3 Übergang z2/z3

Vor dem Moratorium wurde nur eine Messung im Übergangsbereich z2/z3 in der Bohrung 01YEF20 RB217 durchgeführt. Dabei wurde eine Permeabilität kleiner als $5 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ermittelt. Das Messintervall bei 35,7 m in der Bohrung 02YEQ02 RB815, welches ursprünglich zur hydraulischen Charakterisierung des Übergangsbereichs z2/z3 ausgewählt worden war, wurde nach der Überarbeitung des Schichtenverzeichnisses dem Basissalz (z3BS) zugeordnet. Zwei weitere Messungen in der Bohrung 02YEQ02 RB815 belegen für den Übergang z2/z3 (z2SF/z3HA und z2SF/z3HA) eine Permeabilität von kleiner als 10^{-20} m^2 .

5.4 Gorleben-Bank (z3OSM) und Orangesalz (z3OS)

Die Gorleben-Bank ist als eine überwiegend aus Anhydrit bestehende Gesteinsschicht mit einer Mächtigkeit im Bereich von Zentimetern bis zu wenigen Dezimetern in BORNEMANN et al. (2003) beschrieben. Sie ist im Orangesalz (z3OS) eingebettet. In dieser Schicht ist eine wenige Millimeter starke Tonlage enthalten, auf der bereits in geologischen Zeiten, aber auch ausgelöst durch die Auffahrung von Hohlräumen, Verformungen stattfinden. In BÄUERLE et al. (2000) ist die Petrographie und Bedeutung der Gorleben-Bank und ihrer umgebenden Schichten im geologischen System ausführlich beschrieben.

Zur hydraulischen Charakterisierung der Gorleben-Bank mit den umgebenden Schichten des Unteren Orangesalzes (z3OSU) und Oberen Orangesalzes (z3OSO) wurde ein spezielles Untersuchungsprogramm geplant und umgesetzt. Vier Untersuchungslokationen

wurden auf der Basis des geologischen Modells und durch Extrapolation der Spuren der Gorleben-Bank in den Strecken festgelegt. Die Bohrungen sind senkrecht zum Verlauf der Gorleben-Bank (z2OSM) orientiert und durchörtern diese je zweimal pro Bohrung. Details zu den Bohrungen sind PAUL et al. (2013) zu entnehmen. Bis zum Erkundungsstopp im November 2012 konnten mit 01YEA02 RB753 auf der 820-m-Sohle, 03YEA02 RB754 auf der 880-m-Sohle sowie 04YEA01 RB755 auf der 930-m-Sohle drei Bohrungen erstellt und Permeabilitätsmessungen durchgeführt werden. Die Lokationen der Bohrungen sind in Abb. 3 dargestellt.

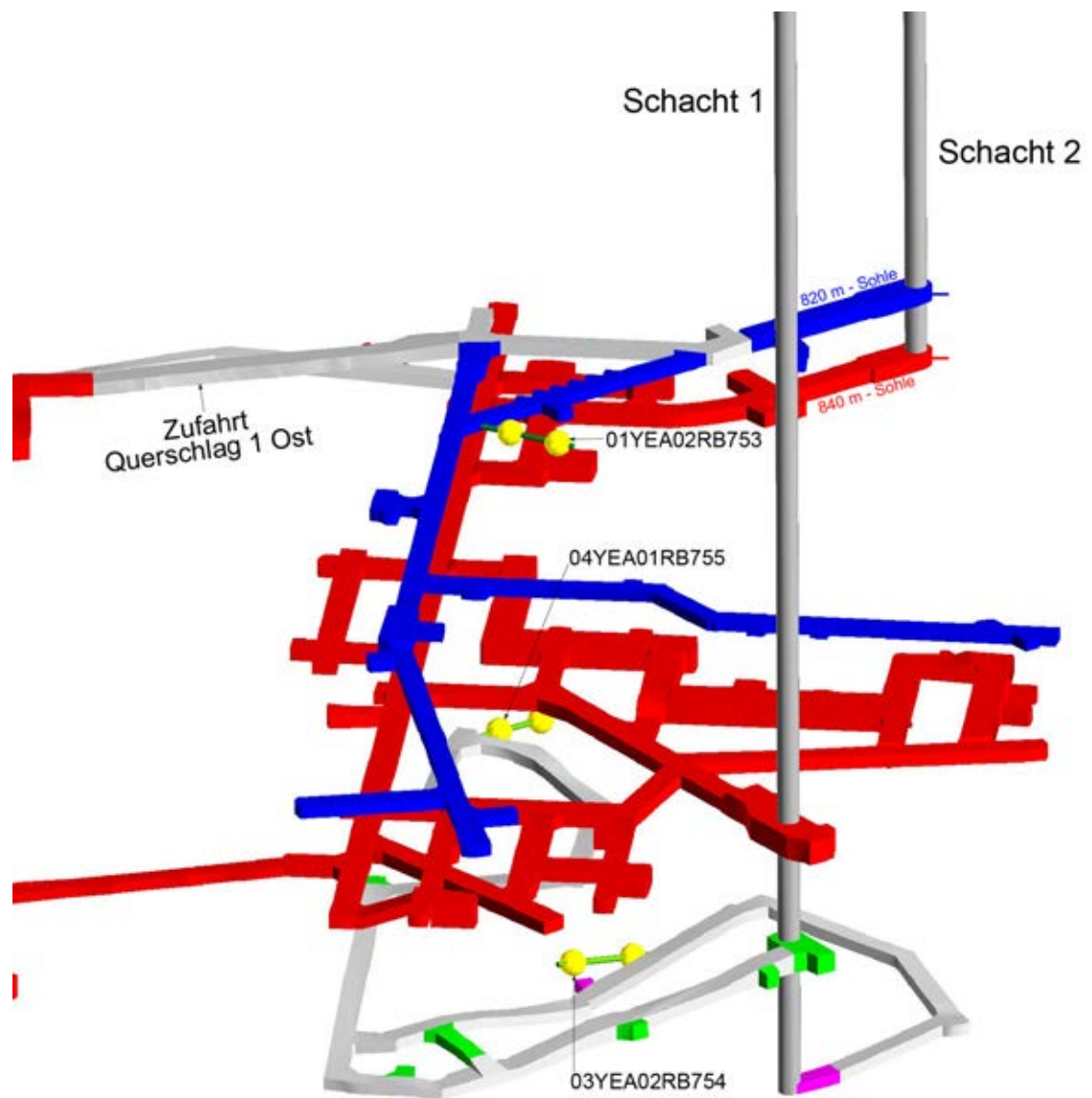


Abb. 3: Lage der Gorleben-Bank-Bohrungen 01YEA02RB753, 03YEA02RB754 und 04YEA01RB755 mit jeweils zwei Gorleben-Bank-Durchgängen (gelbe Kugeln) (geänderte Darstellung aus HAMMER et al., 2012a)

Die Mächtigkeit der Gorleben-Bank variiert in diesen drei Aufschlüssen zwischen 3 cm und 15 cm. Aufgrund der minimalen Messintervalllänge von 1,2 m wurden jeweils das Untere Orangesalz (z3OSU) im Liegenden und das Obere Orangesalz (z3OSO) im Hangenden mit erfasst. Für eine eindeutige Permeabilitätsbestimmung der Gorleben-Bank (z3OSM) aus der integralen Messung mit Unterem und Oberem Orangesalz wurden daher die Permeabilitäten der benachbarten Schichten (z3OSU und z3OSO) separat bestimmt (ZARETZKI et al. 2012).

Die Permeabilität der Gorleben-Bank wurde mit sieben Messungen in sechs verschiedenen Messlokalationen bestimmt. Vereinzelt wurden geringfügige Druckschwankungen beobachtet. Als Ursache für diese untypischen Druckentwicklungen wird ein geringer Gas- bzw. Lösungszutritt angenommen. Aus der 01YEA02 RB753 konnte ein geringer Lösungsaustritt am Bohrlochmund beobachtet werden, dessen Zutrittstelle nicht exakt definiert werden konnte. Es ist allerdings davon auszugehen, dass der beobachtete Lösungszutritt aus der Gorleben-Bank bzw. aus ihrem unmittelbaren Umfeld erfolgt (ZARETZKI et al. 2013). Der Lösungszutritt führte zu einem geringen Druckanstieg im Messintervall. Eine nach fünf Monaten durchgeführte Wiederholungsmessung im selben Messintervall (zwischen 9,9 m und 11,1 m) zeigte keinen Druckanstieg.

Zusätzlich zu der Bestimmung der Permeabilität der Gorleben-Bank wurden als Referenz das Obere Orangesalz (z3OSO) und das Untere Orangesalz (z3OSU) gemessen. Die ermittelten Permeabilitäten des Orangesalzes einschließlich der Gorleben-Bank liegen bei $< 10^{-20} \text{ m}^2$.

Für zwei Messungen im Unteren Orangesalz (z3OSU) in der Bohrung 01YEF20 RB217 wurden jedoch Permeabilitäten von 10^{-18} m^2 ermittelt. An diesen Messlokalationen ist das Untere Orangesalz (z3OSU) mit anhydritischen Flockenlinien stark deformiert und enthält bereichsweise sehr viele Klüfte (NOWAK & WEBER 2002).

5.5 Bewertung und Diskussion der Permeabilität im unverritzten Salzgestein

Die hydraulischen Eigenschaften des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge (z2HS1, z2HS2 und z2HS3) im EB1 wurden durch Permeabilitätsmessung in den Erkundungsbohrungen untersucht. Für das Hauptsalz wurde in den untersuchten Gebirgsbereichen eine Permeabilität von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt.

Auch in den anderen stratigraphischen Einheiten der Staßfurt- und Leine-Folge einschließlich der Gorleben-Bank wurden Permeabilitäten von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt. Im Kaliflöz Staßfurt (z2SF), im Hangendsalz (z2HG), im Unteren Orangesalz (z3OSU), im Liniensalz (z3LS),

im Basissalz (z3BS), im Grauen Salton (z3GT) und im Hauptanhydrit (z3HA) wurden in Einzelfällen Permeabilitäten größer als 10^{-20} m^2 ermittelt (Abb. 4). Diese stratigraphischen Einheiten beinhalten sehr häufig Anhydrit. Die Analyse dieser Einzelfälle legt die Vermutung nahe, dass die Mächtigkeit der erfassten stratigraphischen Einheiten und der darin enthaltene Anhydritanteil eine wichtige Rolle spielt. Stratigraphische Einheiten mit einer Mächtigkeit von mehreren Metern und hohem Anhydritanteil zeigten häufig höhere Permeabilitäten als nur wenige Zentimeter mächtige Einheiten. Im letztgenannten Fall sind die geklüfteten Bereiche (z. B. 01YEA02 RB815, Tiefe 35,7 m), sofern sie vorhanden sind, meist durch Kluftmineralisationen verheilt. Bei mächtigeren stratigraphischen Einheiten können lokal anhydritische Bereiche dominieren, deren Klüfte aufgrund der Mächtigkeit der Anhydritbereiche (z. B. 01YEF20 RB217, 40,5-43,7 m) nicht durch Sekundärmineralisationen verfüllt sind.

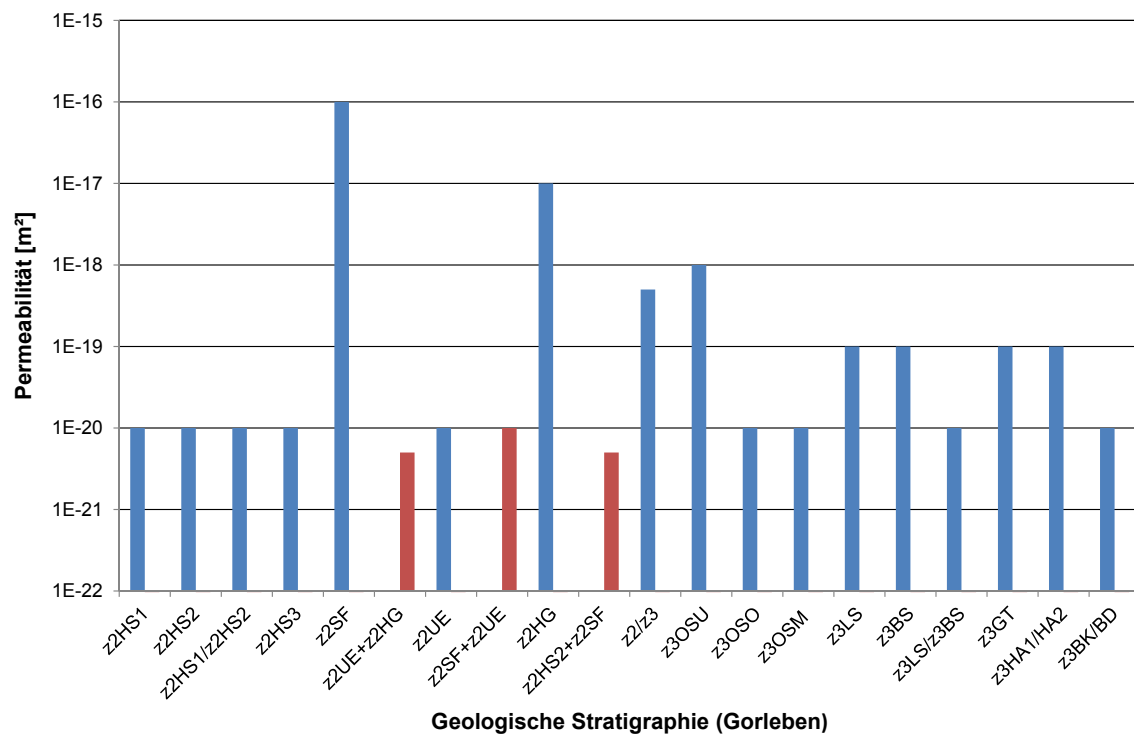


Abb. 4: Zusammenfassende Darstellung der maximal gemessenen Permeabilität in den verschiedenen stratigraphischen Einheiten (blauer Balken – Messungen mit Stickstoff; roter Balken – Messungen mit Lauge)

6 Nahfeldmessungen auf der 840-m-Sohle

Die geplanten Nahfelduntersuchungen in den sogenannten Permeabilitätsquerschnitten (Abb. 5) konnten wegen der Einstellung der Erkundungsarbeiten nicht realisiert werden (vgl. PAUL et al. 2013). Mit diesen Permeabilitätsmessquerschnitten sollte einerseits die Permeabilitätsverteilung um die Grubenräume hinsichtlich Größe und Durchlässigkeit bestimmt werden. Andererseits zielten die Untersuchungen auch auf die Identifizierung von Richtungsabhängigkeiten der Permeabilitätsverteilung sowie die Abhängigkeit der Lokationen bezüglich der komplizierten Geometrie (Ankreuzung von Strecken und Nische) und der geomechanischen Beobachtungen (z. B. starke Verformung) ab.

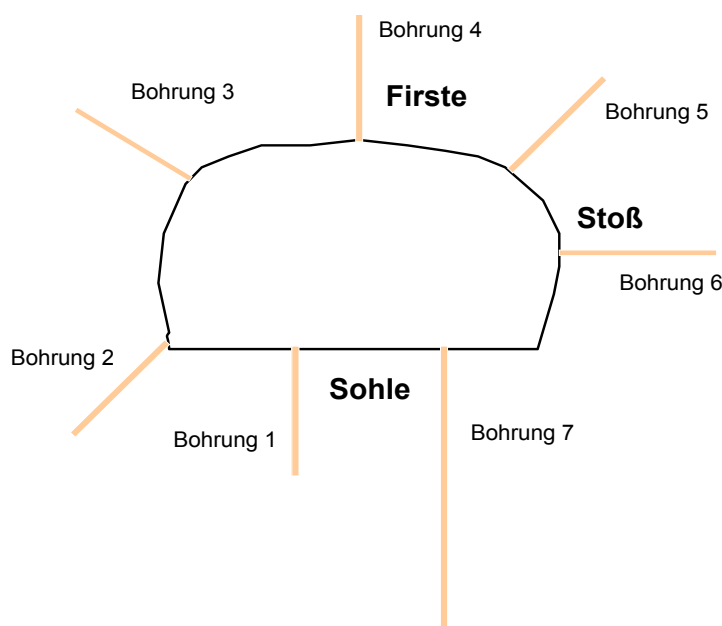


Abb. 5: Geplanter Bohrungsquerschnitt für die Untersuchung im Nahfeld

Intensive Untersuchungen zu Größe und Durchlässigkeitsverteilung von Auflockerungsbereichen wurden in den horizontalen, sechs bis neun Meter langen sogenannten KW-Kurzbohrungen durchgeführt, welche im Rahmen der Kohlenwasserstoffuntersuchungen im Querschlag 1 West und Querschlag 1 Ost erstellt wurden. Bei den Messungen kamen verschiedene Messsysteme mit Messintervalllängen von 10 bzw. 14 Zentimetern zum Einsatz. Das Messprogramm wurde auf die Ergebnisse der unter UV-Licht durchgeführten geologischen KW-Kartierungen und auf die Ergebnisse der ultraschallseismischen Untersuchungen abgestimmt.

Dabei wurden ergänzende Messungen in Bohrungsbereichen mit sichtbaren KW-Imprägnationen sowie in Bereichen mit Anomalien bezüglich der ermittelten Schalllaufzeiten durchgeführt und die zugehörigen Permeabilitäten bestimmt. Einzelne Wiederholungsmessungen erfolgten zur Erfassung potentieller Durchlässigkeitsänderungen infolge von KW-Migration in Abhängigkeit von der Zeit.

6.1 Permeabilitätsmessungen in den KW-Kurzbohrungen im Querschlag 1 West

Im Rahmen der Kohlenwasserstoffuntersuchungen wurden im Querschlag 1 West am östlichen Stoß geologische Erkundungsbohrungen im Knäuel- und Streifensalz (z2HS1 bzw. z2HS2) erstellt. Die Bohrungen haben eine Länge von sechs Metern sowie eine Neigung zwischen 0 und -1 gon. 14 dieser Bohrungen (RB643 bis RB645, RB648, RB649, RB651 bis RB655, RB657 bis RB659 und RB661) wurden für die Durchführung von Permeabilitätsmessungen ausgewählt (Abb.6). In sechs Bohrungen wurde der gesamte erste Bohrmeter zur Ermittlung der repräsentativen Permeabilität im Nahbereich des Querschlags gemessen. Die geplanten Messungen in der Bohrung RB648 konnten aufgrund starker Kohlenwasserstoffzutritte nicht durchgeführt werden.

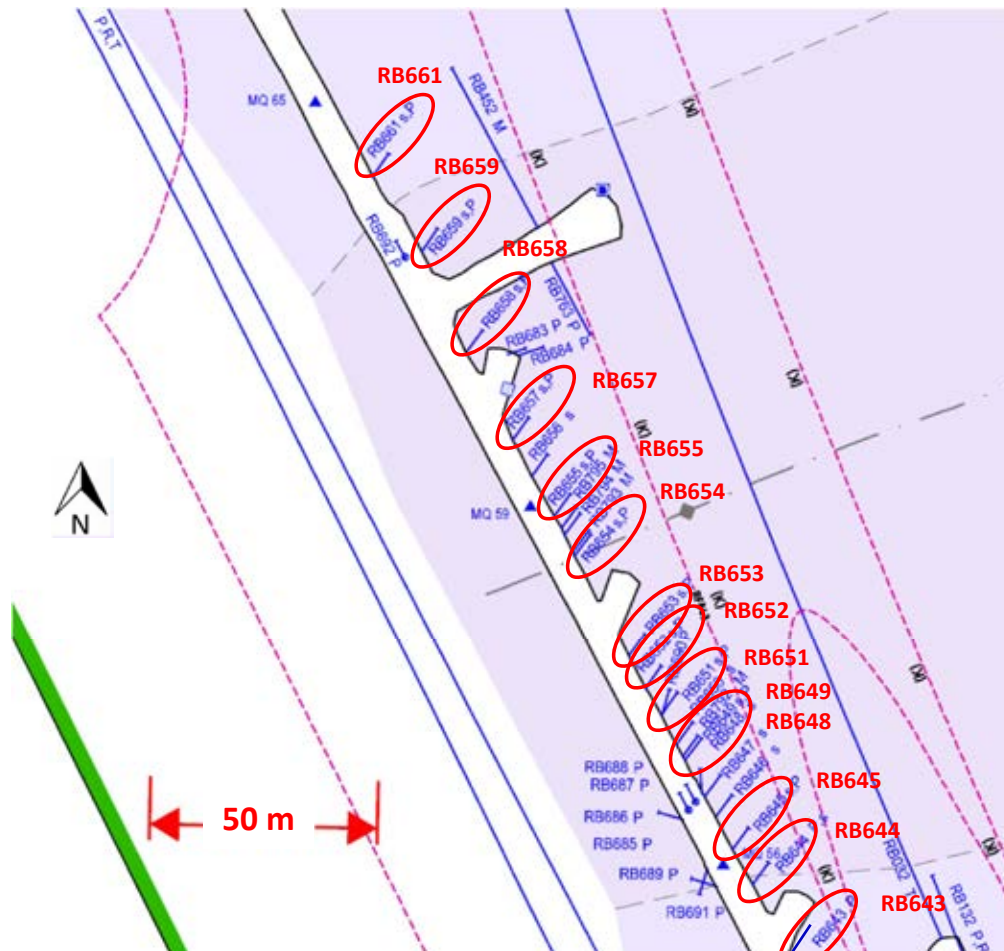


Abb. 6: Lage der KW-Erkundungskurzbohrungen im Querschlag 1 West, rot hervorgehoben sind die für die Permeabilitätsmessungen ausgewählten Bohrungen (DBE 2013)

Die Bohrungen RB661 (z2HS1) und RB653 (z2HS2) wurden als Referenzbohrungen für die Untersuchung des Nahfeldes ausgewählt, da diese weder KW-Imprägnierte Bereiche noch ultraschallseismischen Anomalien aufwiesen. Sämtliche ermittelten Permeabilitäten in

den KW-Kurzbohrungen im Querschlag 1 West sind in Abb. 7 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Ausdehnung der Zonen mit erhöhten Permeabilitäten im Knäuelsalz (z2HS1) größer ist als jene im Streifensalz (z2HS2). Der Bereich mit erhöhten Permeabilitäten von $> 10^{-20} \text{ m}^2$ reicht maximal bis zu einer Entfernung von 2,0 m vom Stoß. In einzelnen Bohrungen war der Abstand geringer.

Vereinzelt geringfügig erhöhte Permeabilitäten korrelieren mit Ergebnissen der ultraschallseismischen Messungen.

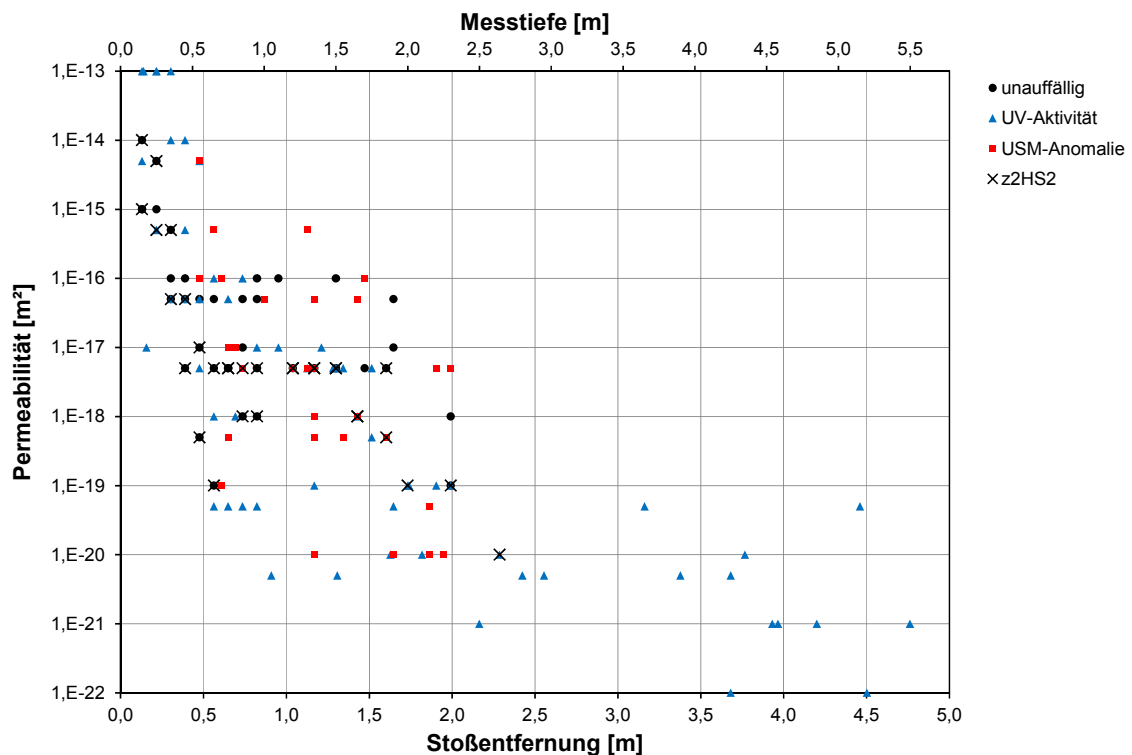


Abb. 7: Permeabilitätsverteilung im Nahfeld des Querschlags 1 West (alle Bohrungen)

6.2 Permeabilitätsmessungen in den KW-Kurzbohrungen im Querschlag 1 Ost

Im Querschlag 1 Ost wurden in acht KW-Kurzbohrungen (RB665, RB667, RB669, RB673, RB676, RB679, RB681 und RB682) im Knäuel- und Streifensalz (z2HS1 bzw. z2HS2) Permeabilitätsmessungen durchgeführt (Abb. 8). Die Bohrungen wurden zuerst mit einer Länge von 6 m und danach bis zu einer Endtiefe von ca. 9 m mit einer Neigung von ca. 1 gon schräg zum Streichen der Schichten im östlichen Stoß erstellt (PAUL et al. 2013). Ausnahme bilden die drei Bohrungen RB671 bis RB673, welche senkrecht zum Stoß erstellt wurden.

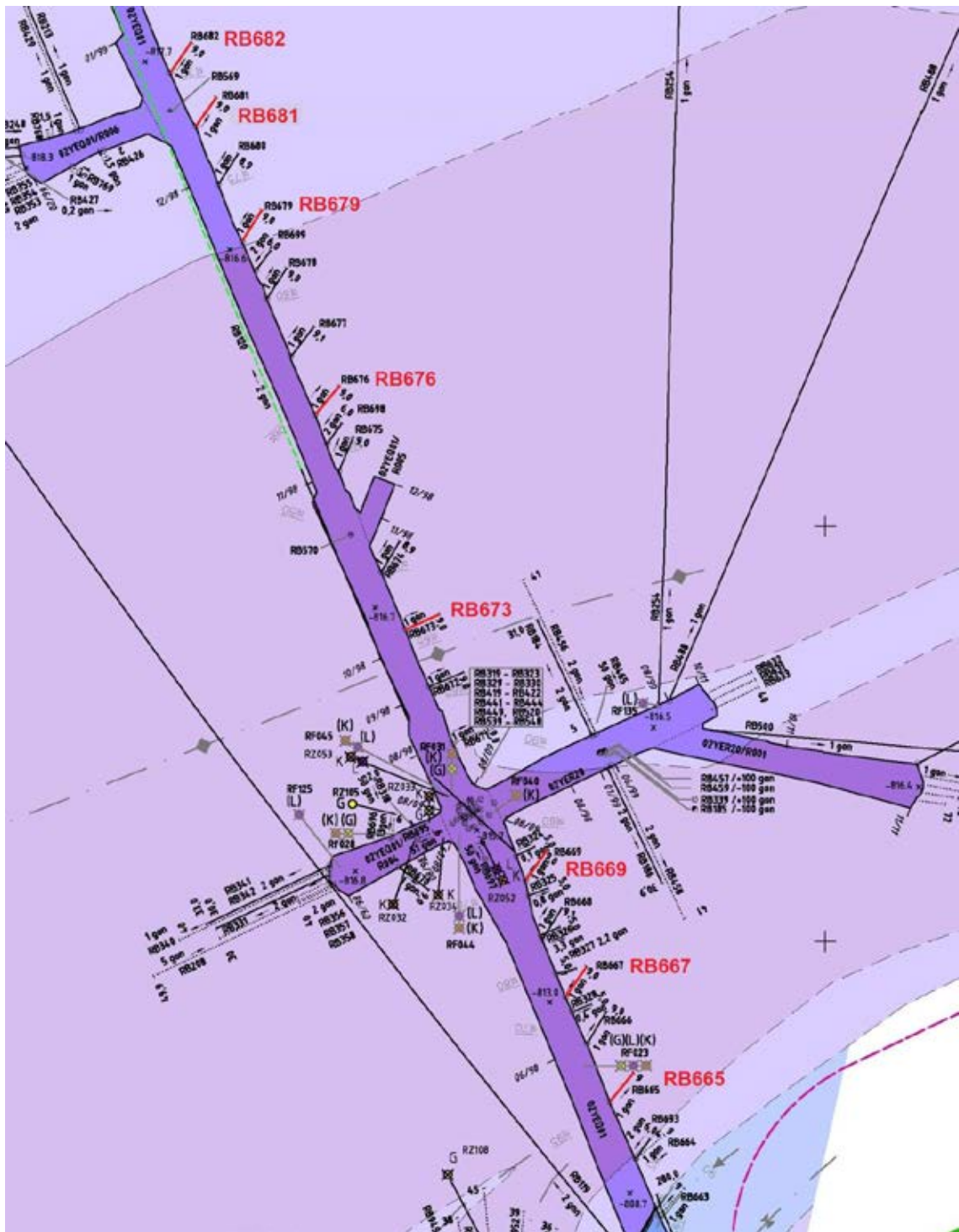


Abb. 8: Lage der KW-Kurzbohrungen RB663 bis RB682 im geologischen Riss, rot hervorgehoben sind die für die Permeabilitätsmessungen ausgewählten Bohrungen (DBE 2013)

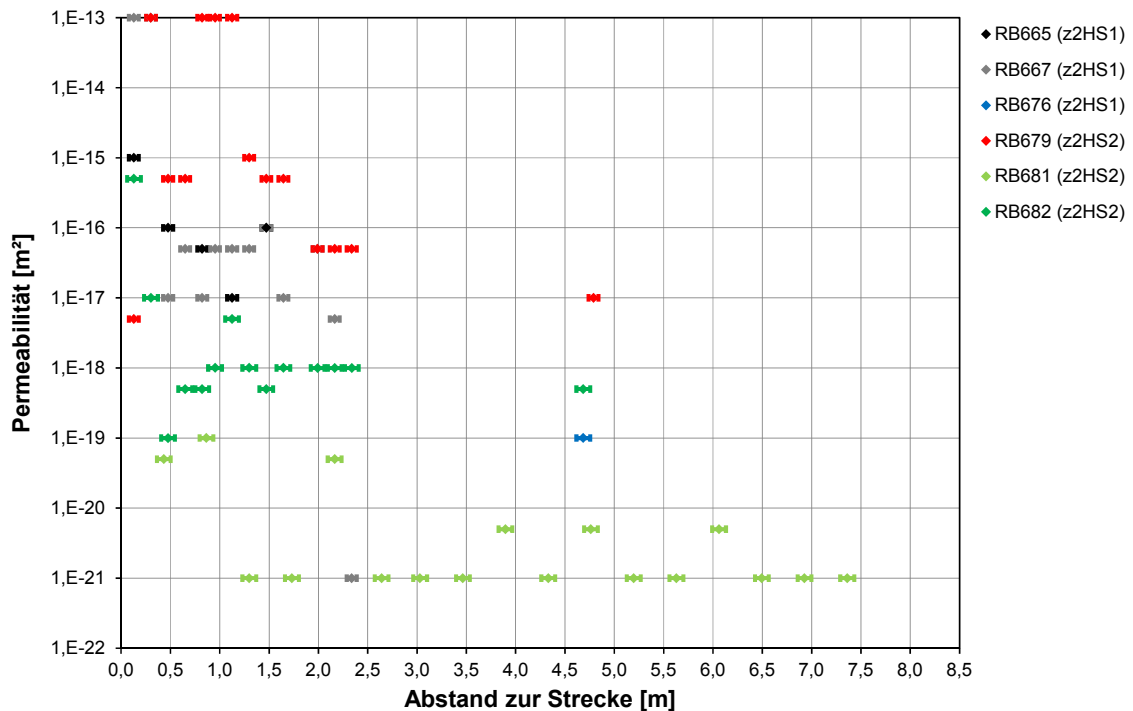


Abb. 9: In der ersten Messkampagne im Querschlag 1 Ost und in der RB681 ermittelte Permeabilitäten

Im Querschlag 1 Ost ist auf den ersten Metern der Bohrungen ebenfalls eine tendenzielle Abnahme der Permeabilität mit zunehmender Entfernung zum Querschlag zu beobachten. Die in der ersten Messkampagne vor der Verlängerung von Bohrungen (ZARETZKI et al. 2013) ermittelte Permeabilitätsverteilung entspricht der erwarteten Permeabilitätsverteilung im Nahfeld (Abb. 9).

In späteren Messeinsätzen nach der Verlängerung der Bohrungen wurden auch in den tieferen Bereichen der Bohrungen höhere Permeabilitäten gemessen. Die durchgängig erhöhten Permeabilitäten bis in das Bohrlochtiefste waren aufgrund der bis dahin erzielten Erkenntnisse nicht plausibel. Aus diesem Grund wurden zunächst Wiederholungsmessungen mit unterschiedlichen Messausrüstungen durchgeführt. Der Einsatz unterschiedlicher Messausrüstungen führte jedoch zu keinen Änderungen der vergleichsweise hohen Permeabilitäten, so dass gerätespezifische Messfehler ausgeschlossen wurden. Für die weitergehende Analyse der Ursache für die vergleichsweise hohen Permeabilitäten erfolgten anschließend Kamerabefahrungen in den Bohrungen. Im Rahmen dieser Kamerabefahrungen wurden Rillen in den Bohrlochwänden festgestellt, die bei der Verlängerung der Bohrungen verursacht wurden und zu einer verminderten Abdichtung der Messintervalle führten. Daher war bei den Messungen eine vergleichsweise starke Druckabnahme zu beobachten, die in einer scheinbar erhöhten Permeabilität resultierte (ZARETZKI et al. 2013). Aufgrund dieses signifikanten Einflusses der Rillen auf die ermittelten

Permeabilitäten können diese Messungen nach Verlängerung der Erkundungsbohrungen nicht berücksichtigt werden. Die Ausnahme bildet die Bohrung RB681, in der keine Rillen auf der Bohrlochwand zu beobachten waren.

In der ersten Messkampagne wurden in den Bohrungen RB676, RB679 und RB682 für Abstände zwischen 4,5 m und 5,0 m erhöhte Permeabilitäten ermittelt. Diese erhöhten Permeabilitäten korrelieren mit den Ergebnissen der ultraschallseismischen Messungen, die Anomalien bezüglich der Schallgeschwindigkeiten für diese Messbereiche ausweisen. Die Bohrkernaufnahme liefert dagegen keine geologischen Besonderheiten.

6.3 Messungen in KW-imprägnierten Bereichen

Die geologische Ansprache der Bohrkern aus den Erkundungsbohrungen in den Querschlägen wurde durch den Einsatz von UV-Licht unterstützt, so dass KW-imprägnierte Bereiche in den Erkundungsbohrungen lokalisiert werden konnten. Die Messintervalle für die Permeabilitätsmessungen wurden in Abhängigkeit von der räumlichen Verbreitung dieser KW-imprägnierten Bereiche in den Bohrungen angeordnet. Im Querschlag 1 Ost wurden deutlich weniger und kleinere KW-imprägnierte Bereiche als im Querschlag 1 West lokalisiert. Diese KW-imprägnierten Bohrungsbereiche waren durch ansteigende oder schwankende Druckverläufe oder auch verlangsamte Druckabfallraten gekennzeichnet.

Die beobachteten Druckanstiege betragen meist einige Millibar. Ein Konvergieren der Bohrung als Ursache für diese geringen Druckanstiege insbesondere für die Druckschwankungen kann ausgeschlossen werden, da einerseits das Messequipment bei der Wiederholungsmessung problemlos eingesetzt werden konnte (Kap. 6.4), andererseits die Druckanstiegsrate bei der Wiederholungsmessung nachgegeben hatte. Daher ist zu postulieren, dass die geringen Zutritte mit unregelmäßiger Fließrate aus dem Gebirge in das Messintervall stattfanden. Die Zutrittsrate nimmt in manchen Fällen kontinuierlich ab, schwankt aber auch häufig während der Messungen. Die maximale Permeabilität in den KW-imprägnierten Bereichen im tiefen Bereich beträgt $5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ und wurde in der Bohrung RB655 in einer Entfernung von 3,16 m und 4,46 m zum Stoß ermittelt (Abb. 7).

Die Permeabilitätsmessungen im unmittelbaren Nahfeld (einige Dezimeter vom Stoß) wurden nicht durch Kohlenwasserstoffe beeinflusst.

6.4 Wiederholungsmessungen im Nahfeld

Mit den Wiederholungsmessungen in den geologischen KW-Kurzbohrungen sollte geprüft werden, ob nach einem Austritt von Kohlenwasserstoffen eine Veränderung der Permeabilität in KW-imprägnierten Bereichen vorliegt.

Aus diesem Grund wurden in fünf ausgewählten Messintervallen im Querschlag 1 West, in welchen die Druckentwicklung bei der Erstmessung von dem erwarteten Verlauf abwich, jeweils zwei Folgemessungen, in vier Messintervallen im Querschlag 1 Ost jeweils eine Folgemessung durchgeführt (ZARETZKI et al. 2012, ZARETZKI et al. 2013). Die Festlegung der Messintervalle erfolgte auf Grundlage der Beobachtungen bei der Erstmessung nach folgenden Kriterien:

- Nach einem anfänglichen Druckabfall trat ein Druckanstieg im Messintervall auf.
- Ein Druckanstieg im Messintervall war für die gesamte Messdauer festzustellen.
- Der Druck im Messintervall blieb während der Messdauer - von geringen Druckschwankungen abgesehen – annähernd konstant.

Die ersten Wiederholungsmessungen erfolgten nach 4 bzw. 8 Monaten. Weitere Wiederholungsmessungen wurden nach rund 7 bzw. 17 Monaten durchgeführt. Dabei war kein einheitlicher Trend bezüglich der Druckentwicklung im Messintervall festzustellen. Es gibt sowohl Messlokationen, in denen der Druck bei der Wiederholungsmessung kontinuierlich, jedoch von den theoretischen Druckabbaukurven abweichend, abnahm. Ferner gibt es Messintervalle, in denen der Druck bei der Wiederholungsmessung weiterhin schwankte oder sogar noch stärker anstieg. Eine Messung nach dem vollständigen Austritt der Kohlenwasserstoffe, wobei kein Druckanstieg und keine Druckschwankung zu beobachten ist, war innerhalb des zur Verfügung stehenden Zeitrahmens in den meisten Bohrungen nicht möglich (ZARETZKI et al. 2013).

6.5 Bewertung und Diskussion der Permeabilität im Nahfeld (840-m-Sohle)

Für die Bewertung der Permeabilität im Nahfeld wurden nur Messungen betrachtet, in denen technische bedingte Einflüsse ausgeschlossen werden konnten. Messungen, in denen keine ausreichende Abdichtung des Messintervalls aufgrund von Rillen in der Bohrlochwand gewährleistet werden konnte, sind nicht Bestandteil der Bewertung. Die mit dem Einfachpackersystem durchgeführten Integralmessungen wurden im Rahmen der Bewertung nicht berücksichtigt.

Insgesamt wurden 132 Messungen in den Bohrungen im Querschlag 1 West und 59 Messungen in den Bohrungen im Querschlag 1 Ost in Abbildung 10 berücksichtigt.

Im unmittelbaren Nahfeld (einige Dezimeter vom Stoß) der Grubenräume wurden Permeabilitäten von bis zu 10^{-13} m^2 bestimmt. Bis zu einer Entfernung von 2,5 m vom Stoß können erhöhte Permeabilitäten von $>10^{-20} \text{ m}^2$ auftreten. Werden die Abstände der Einzelmessungen zum Stoß auf den von STORMONT et al. (1991) definierten effektiven Radius des Hohlraums mit der Querschnittsfläche normiert, ergibt sich eine Permeabilitätsverteilung, die der des Standortes WIPP entspricht (Abb. 10).

In Messintervallen, für die Anomalien der Schalllaufzeiten identifiziert wurden, ist die ermittelte Permeabilität gegenüber Messungen in unauffälligen Bohrungsbereichen tendenziell geringfügig erhöht.

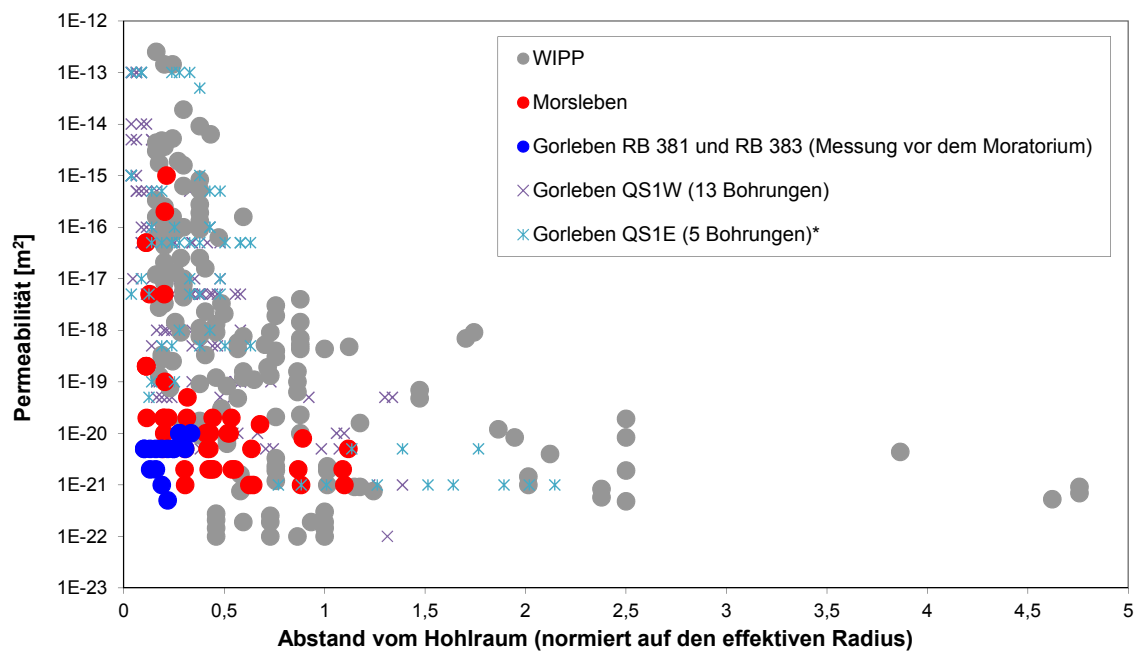


Abb. 10: Permeabilitätsverteilung im Nahfeld der Grubenbaue (nach NOWAK & WEBER 2002)

* Im Querschlag 1 Ost wurden nur die Daten aus der ersten Messkampagne mit Doppelpackersystem berücksichtigt (ZARETZKI et al. 2013)

7 Quantifizierung von KW-Vorkommen

Bei der Auffahrung des Erkundungsbereiches wurden in begrenzten Lokationen in den Schichten des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge Bereiche von unterschiedlicher Größe mit Kohlenwasserstoffimprägnationen aufgeschlossen. Im Hinblick auf eine Sicherheitsanalyse sind neben den Untersuchungen zu ihrer Verteilung folgende Fragestellungen zu diesen KW-Imprägnationen zu beantworten:

- Entstehung der aufgeschlossenen KW-Vorkommen durch geochemische Analysen ihrer Zusammensetzung,
- Quantifizierung der aufgeschlossenen KW-Vorkommen durch Druckaufbaumessungen und Bestimmung der KW-Zutrittsmengen und –raten sowie
- Nachweis der Isoliertheit bzw. Interkonnektivität der aufgeschlossenen KW-Vorkommen.

Unter Berücksichtigung dieser Zielstellungen wurden folgende Aspekte bei der Planung und Ausführung der Messungen berücksichtigt:

- Langzeitüberwachung,
- kontinuierliche Messung mit hochauflösenden Messapparaturen,
- Installation der Messintervalle in den Bohrungen außerhalb des Auflockerungsbereiches im Nahfeld der Grubenräume und
- getrennte Probenahme von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung.

Durch die Langzeitüberwachung sollen die Druckentwicklung und das Gesamtvolumen von einzelnen KW-Vorkommen erfasst und quantifiziert werden. Insgesamt wurden 20 KW-Packerbohrungen (RB683 – RB702) ergänzend zu den geologischen KW-Kurzbohrungen im Querschlag 1 West (Abb. 11, links) und im Querschlag 1 Ost (Abb. 11, rechts) gestoßen und instrumentiert (vgl. PAUL et al. 2013). Ein Großteil dieser KW-Packerbohrungen wurde in Bereichen mit deutlich sichtbaren oder mit UV-Licht identifizierten KW-Imprägnationen auf der Kontur der Grubenräume angeordnet. Die sechs Meter langen Bohrungen wurden in Bohrungstiefen von ca. 3 m mit Einzelpackern abgedichtet, damit das Messintervall (Packer bis Bohrloch tiefstes) auch bei geneigten Bohrungen mit Sicherheit außerhalb eines Auflockerungsbereiches angeordnet ist.

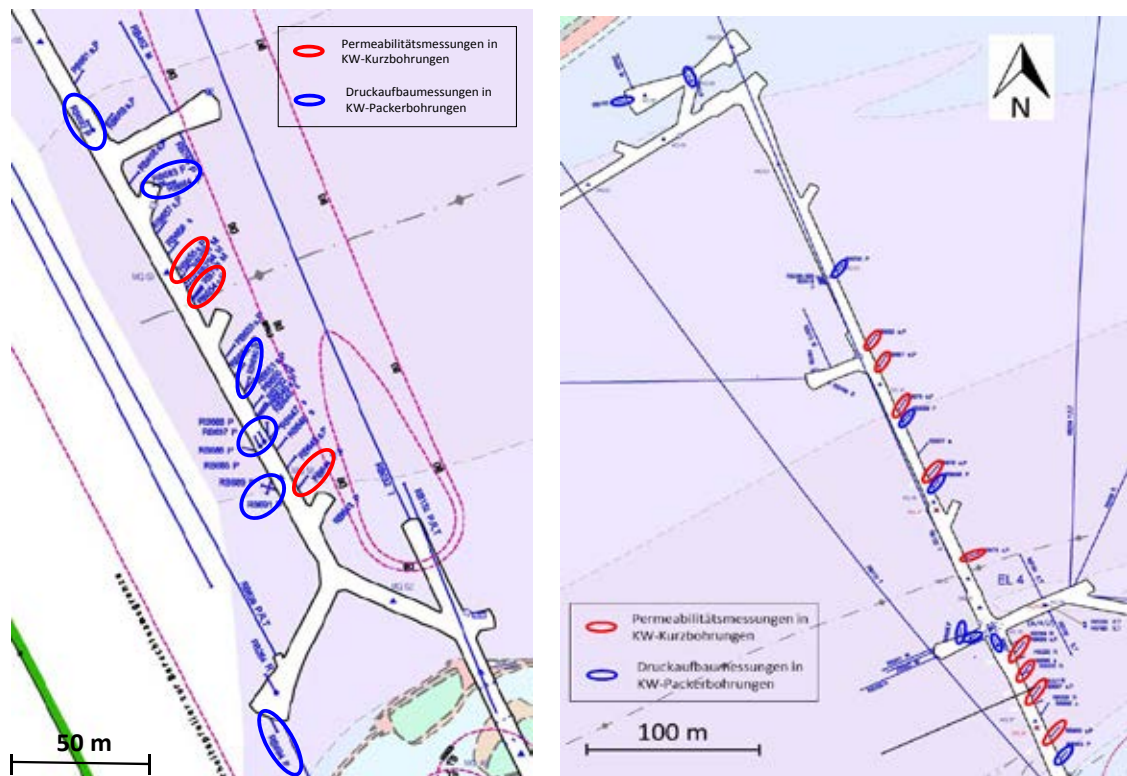


Abb. 11: KW-Packerbohrungen im Querschlag 1 West (links) und Querschlag 1 Ost (rechts) (Ausschnitt aus DBE 2013)

7.1 **Klassifizierung der KW-Packerbohrungen anhand der Druckaufbaumessungen**

Mit den 20 KW-Packerbohrungen wird ein breites Spektrum KW-imprägnierter Bereiche erfasst. Von starken, unter natürlichem Licht sichtbaren Imprägnationen über schwache, nur unter UV-Licht sichtbare Bereiche bis hin zu Bereichen ohne Imprägnationen (Referenzbohrungen) sind alle Übergänge vorhanden. Anhand des gemessenen Druckaufbaus und der daraus errechneten Zutrittsmenge können die KW-Packerbohrungen in vier Kategorien eingeteilt werden:

- Kategorie 1: sehr geringer Druckaufbau (< 0,3 bar)
- Kategorie 2: geringer Druckaufbau (< 10 bar, keine Druckentlastung erforderlich)
- Kategorie 3: intensiver Druckaufbau (anfänglich häufige Druckentlastung erforderlich)
- Kategorie 4: sehr intensiver Druckaufbau (ständige Druckentlastung erforderlich)

Von den insgesamt 20 KW-Packerbohrungen sind 10 Bohrungen der Kategorie 1 zuzuordnen. Dazu gehören die RB684, die RB691 und die RB692 im Querschlag 1 West, die RB693, die RB695 und die RB697 bis RB700 im Querschlag 1 Ost sowie die RB702 im Bohrort 5. Der maximal gemessene Druck in diesen Bohrungen liegt bei 0,2 bis 0,3 bar. In allen Bohrungen ist ein geringfügiger Druckanstieg zu beobachten. Die KW-imprägnierten Bereiche in diesen Bohrungen sind entweder als Bereiche mit schwacher oder starker UV-Intensität charakterisiert, betreffen aber insgesamt nur ein sehr begrenztes Volumen.

Die Bohrungen RB690 im Querschlag 1 West sowie RB696 im Bohrort 3.1 und RB701 im Bohrort 5 sind aufgrund eines geringen Druckaufbaus der Kategorie 2 zuzuordnen. Obwohl anhand der Bohrkerne im Intervallbereich zwischen drei und sechs Metern mehrere Abschnitte mit starker oder schwacher UV-Aktivität identifiziert wurden, bleibt der Druck im Messintervall kleiner als 10 bar.

Die RB683 in der sogenannten UV-Nische (02YEQ02/R006), die RB694 im Bohrort 1.2 sowie die RB686 und die RB687 bei der Zutrittsstelle RF81 (alle Querschlag 1 West) werden der Kategorie 3 zugeordnet. Die Druckkurven der vier Bohrungen sind durch einen steilen, stufenartigen Anstieg charakterisiert. Der Druckaufbau in der RB683 und der RB687 hat sich nach einem anfänglich starken Anstieg (einige Tage bis wenige Wochen) abgeschwächt.

Drei Bohrungen im Querschlag 1 West (RB685, RB688 und RB689) sind der Kategorie 4 zuzuordnen. Die Intensität des Druckanstieges ist nach mehr als zwei Jahren unverändert hoch, so dass weiterhin Druckentlastungen in Zeitabständen von zwei bis drei Tagen notwendig sind. In der RB688 wurde die größte Gaszutrittsrate mit durchschnittlich 5 Gramm pro Tag gemessen.

7.2 Gasvolumenbestimmung und Bestimmung des Einflussbereichs im Gebirge

Zur Abschätzung der Gasvolumina und der Massenflussrate aus den in den Messintervallen registrierten Drücken wird die Massenbilanztheorie für ideale Gase angewandt. Für diese Berechnung wurde auf Grundlage der im Labor bestimmten Zusammensetzung (40% Methan, 40% Stickstoff und 20% andere Gase, darunter Propan, Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff) der gasförmigen Kohlenwasserstoffe ein Syntheseparametersatz mit einer spezifischen Gaskonstante von 363,84 J/kg K, einer Dichte von 1,0458 kg/m³ und einer dynamischen Viskosität von 14,49 µPa·s berechnet (ZARETZKI et al. 2012). Unter Verwendung des Syntheseparametersatzes und der Massenbilanztheorie konnte in allen drei Bohrungen (RB685, RB688, RB689) eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Gasmengen erzielt werden. Die größten KW-Zutrittsmengen sind

bisher in der Bohrung RB688 beobachtet worden (Abb. 12). Seit der Herstellung der Bohrung am 04.08.2011 bis zum Verschließen der Bohrung am 27.02.2014 (938 Tage) sind insgesamt 7,1 m³ an gasförmigen und 27,8 Liter an flüssigen KW aus der Bohrung RB688 entnommen worden (Tab. 2).

Tab. 2: Menge der flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffe in den Bohrungen RB685, RB688 und RB689 unter Normbedingungen bis zum Verschließen der Bohrungen am 27.02.2014

Bohrung	Länge des KW- imprägnierten Bereiches [m]	Summe des Kondensatvolumens [l] bis 27.2.2014	Summe des Gasvolumens [stdl] bis 27.02.2014
RB685	1,85	3,28	3.004
RB688	1,27	27,83	7.114
RB689	1,31	2,06	4.446

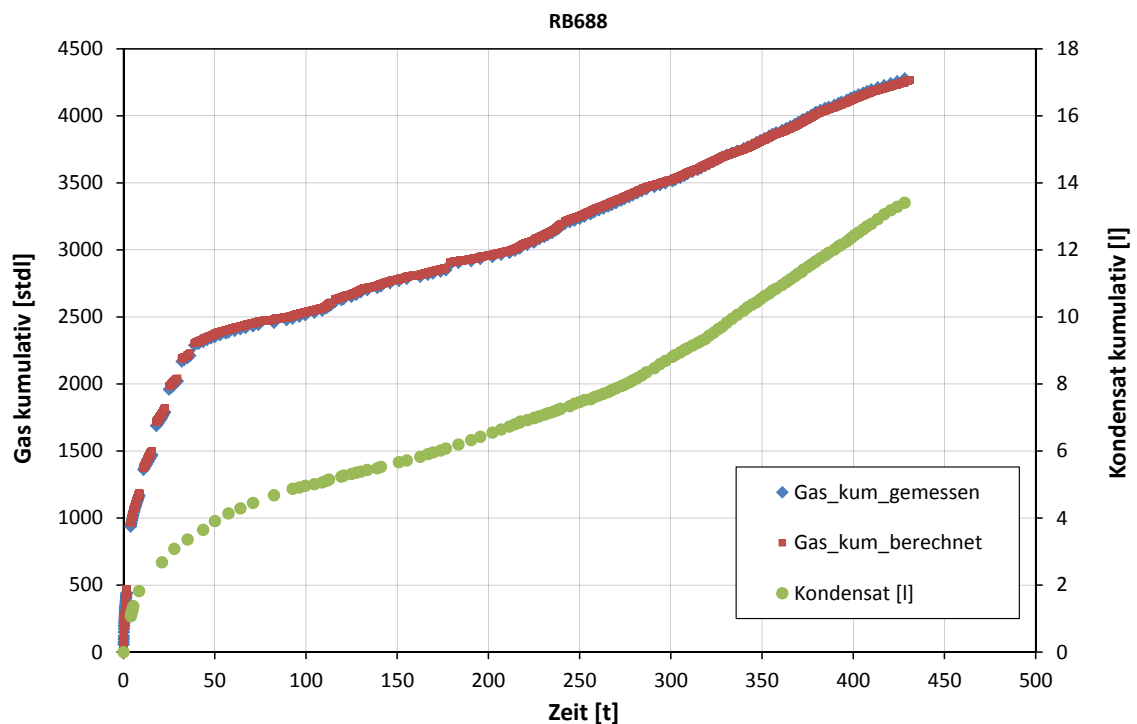


Abb. 12: Kumulatives Volumen gasförmiger und flüssiger KW aus der Bohrung RB688 (bis zum 27.02.2014) unter Normbedingungen

Für die Bohrkern aus den Bohrungen RB685, RB686 und RB687 wurden im Labor Porositäten zwischen 0,6 % und 1,26 % ermittelt. Mit der Annahme, dass die KW im Porenraum des Gebirges gespeichert sind, ergibt sich unter Berücksichtigung der ermittelten Gesteinsporosität ein Gebirgsvolumen von einigen Kubikmetern zur Speicherung der

erfassten gasförmigen und flüssigen KW. Eine abschließende Aussage zum Volumen der KW-Vorkommen kann aufgrund der anhaltenden KW-Zutritte, insbesondere in den Bohrungen RB685, RB688 und RB689, bislang nicht getroffen werden. Die Langzeitmessungen hätten zumindest in den drei Bohrungen mit intensiven KW-Zutritten weitergeführt werden sollen, bis kein weiterer KW-Zutritt in die Bohrung mehr erfolgt.

Im März 2014 wurden auf Weisung des BfS die Messungen in den KW-Packerbohrung abgebrochen, die Messeinrichtungen aus- und abgebaut und die Bohrungen verschlossen. Eine Fortführung der Messung mit dem Ziel einer Quantifizierung der durch die Bohrungen aufgeschlossenen KW-Vorkommen ist daher nicht möglich.

7.3 Quantifizierung der KW-Zutrittsraten

Aufgrund der Beschränkung des maximal zulässigen Intervalldrucks des Packersystems auf 10 bar müssen für einige Bohrungen sehr häufig Druckentlastungen vorgenommen werden. Zwischen zwei Entlastungen existiert somit eine Druckaufbauphase. In der RB688 beispielsweise wurden bis zum 27.02.2014 insgesamt 430 Druckaufbauphasen registriert. Werden die einzelnen Druckanstiege auf die jeweiligen Zeitbasen normiert, ergibt sich eine spezifische Druckanstiegsrate (bar/Tag bzw. bar/h). In der Anfangsphase fallen die Druckanstiegsraten mit fortschreitender Dauer signifikant ab und die Varianz der Messwerte ist sehr gering. In einer zweiten Phase nimmt die Varianz der Druckanstiegsraten zu und die Druckanstiegsraten sind annähernd konstant. Dieser Befund trifft neben der RB688 und der RB689 auch auf die RB685 und die RB686 zu (ZARETZKI et al. 2013). Inwieweit diese zeitliche Änderung mit der örtlichen Verteilung der Kohlenwasserstoffe im Gebirge korrelierbar ist, bedarf eines langzeitlichen Monitorings und einer weitergehenden kontinuierlichen Auswertung. Denkbar ist, dass der Gaszutritt in der Anfangsphase aus dem unmittelbaren Nahbereich der Bohrung (Auflockerungszone durch das Bohren) erfolgt. In späteren Phasen strömen dann KW aus Bereichen mit etwas größeren Abständen zu den Bohrungen zu.

7.4 Isoliertheit / Konnektivität

Um die Konnektivität zwischen den KW-Vorkommen zu untersuchen, wurden paarweise angeordnete KW-Packerbohrungen mit unterschiedlichen Abständen in die Planung einbezogen und umgesetzt. Der Abstand zwischen der RB684 und der RB763, eine Vorbohrung zur Gesteinskerngewinnung, beträgt zum Beispiel ca. 10 m, jener zwischen der RB683 und der RB684 ca. 6 m. In der Zutrittsstelle RF81 wurden die vier Bohrungen RB685 bis RB689 mit Abständen zwischen 2,5 m und 5 m angeordnet. Der Abstand zwischen der RB689 und der RB691 ist mit rund 0,6 m am geringsten (Abb. 13). Aufgrund

des geringen Abstandes erfolgt für die letztgenannten Bohrungen eine nähere Analyse der Messergebnisse mit Blick auf eine potentielle Konnektivität zwischen den Bohrungen bzw. der durch die Bohrungen aufgeschlossenen KW-Vorkommen.

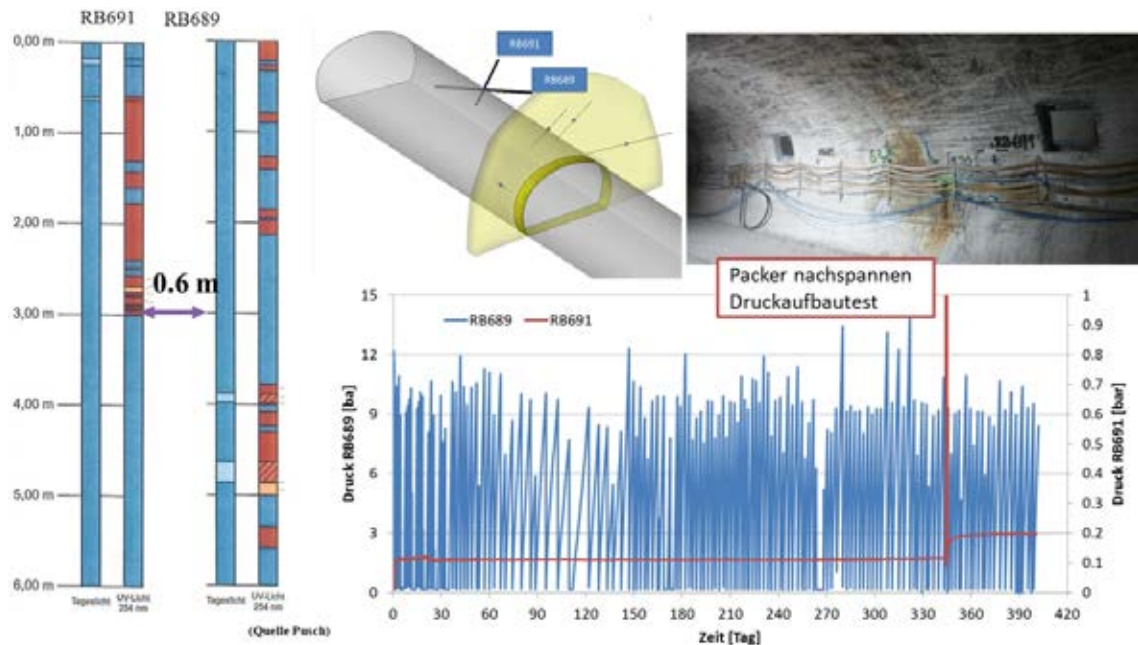


Abb. 13: UV-Profil, Lokation, Anordnung und Druckaufbaumaessungen der RB689 und der RB691

Während in der RB689 ein sehr intensiver Druckaufbau mit hochfrequenten Druckentlastungen über die gesamte Messdauer beobachtet wurde, blieb der Druck in der Bohrung RB691 von diesen Druckwechseln unbeeinflusst. Eine Konnektivität des in der RB689 detektierten KW-Vorkommens mit der RB691 kann anhand der bislang gewonnenen Daten daher ausgeschlossen werden. Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass ein Druckaufbau in den Bohrungen nur dann erfolgt, wenn ein KW-imprägnierter Bereich unmittelbar durch die Bohrung selbst oder durch die Auflockerungszone der Bohrung aufgeschlossen wird. Bereits bei einem kleinen Abstand der Bohrung zum Imprägnationsbereich können die Kohlenwasserstoffe aufgrund der geringen Permeabilität des Salzgesteins nicht in die Bohrung migrieren. Dieser Abstand kann derzeit noch nicht näher quantifiziert werden, beträgt in dem hier beschriebenen Fall aber weniger als 0,6 m.

Für die weiteren benachbarten Bohrungen konnte bislang ebenfalls keine gegenseitige Beeinflussung der in den Messintervallen gemessenen Drücke beobachtet werden. Folglich sind die aufgeschlossenen KW-Vorkommen nach bisherigem Kenntnisstand als isoliert zu betrachten. Es findet keine Migration statt, solange sich die KW-Vorkommen außerhalb der durch die Auffahrung und die Bohrung entstehenden Auflockerungszonen befinden. Grund ist die extrem niedrige Permeabilität im unverritzten Hauptsalz der Staßfurt-Folge.

8 Zusammenfassung

Zur Beurteilung der hydraulischen Eigenschaften des Salzstocks Gorleben wurden im Arbeitspaket Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. In diesem Bericht sind die felshydraulischen In-situ-Messungen nach dem Moratorium, von Oktober 2010 bis Ende 2012, zusammengefasst. Zusätzlich werden die vor dem Moratorium in den geologischen Erkundungsbohrungen durchgeführten Permeabilitätsmessungen in die Bewertung einbezogen.

Schwerpunkte der felshydraulischen In-situ-Messungen sind:

- Bestimmung und Beurteilung der Permeabilität des ungestörten salinaren Gebirges im Erkundungsbergwerk Gorleben mit den stratigraphischen Einheiten der Staßfurt-Folge (z2) und der Leine-Folge (z3) des Zechstein-Salinars,
- Bestimmung und Bewertung der hydraulischen Eigenschaften der Gorleben-Bank (z3OSM),
- Bestimmung der Permeabilität und Permeabilitätsverteilung im Nahbereich der Grubenbaue auf der 840-m-Sohle sowie
- Hydraulische Charakterisierung von KW-impregnierten Gebirgsbereichen durch Langzeitmessungen.

In sieben geologischen Erkundungsbohrungen 02YEQ01 RB427, 02YEQ01 RB194, 01YEF20 RB217, 01YEA02 RB132, 02YEQ02 RB639, 02YEQ02 RB815 und 02YER02 RB255 wurden in verschiedenen stratigraphischen Einheiten hydraulische Bohrlochmessungen zur Charakterisierung des ungestörten Salinars durchgeführt. Die Auswertungen führten in den Schichten des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge (z2) mit dem Knäuelsalz (z2HS1), dem Streifensalz (z2HS2) und dem Kristallbrockensalz (z2HS3) weitgehend zu Permeabilitätsobergrenzen von $< 10^{-20} \text{ m}^2$. Dies gilt auch für die anderen in den Bohrungen angetroffenen stratigraphischen Einheiten der Staßfurt-Folge (z2), wie dem Hangendsalz (z2HG), den Kieseritischen Übergangsschichten (z2UE) und dem Kaliflöz Staßfurt (z2SF). Eine Ausnahme bildet ein Messintervall in der Bohrung 01YEA02 RB132 im Kaliflöz Staßfurt (z2SF), welches als Trümmercarnallitit ausgebildet war. Hier wurde eine deutlich erhöhte Permeabilität mit Werten von bis zu 10^{-16} m^2 ermittelt. Auch für das Hangendsalz (z2HG) wurde in der Bohrung 02YEQ02 RB815 im Messintervall zwischen 26,4 m und 27,6 m eine erhöhte Permeabilität von $< 10^{-17} \text{ m}^2$ ermittelt. In zwei benachbarten Messintervallen wurde jedoch eine Permeabilität von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt. Die erhöhten Permeabilitäten sind daher lokal begrenzt und nicht als Materialkennwert für die jeweilige stratigraphische Einheit anzusetzen.

Auch in der Leine-Folge (z3) wurden überwiegend Permeabilitäten von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt. Geringfügig erhöhte Permeabilitäten von $< 10^{-19} \text{ m}^2$ wurden bei je einer Messung im Hauptanhydrit (z3HA), im Grauen Salztön (z3GT) und im Liniensalz (z3LS) ermittelt. In der Bohrung 01YEF20 RB217 wurde in einem Messintervall im Unteren Orangesalz (z3OSU) eine Permeabilität von $< 10^{-18} \text{ m}^2$ bestimmt. Bis auf diese Ausnahme lieferten die Ergebnisse der Messungen zur Permeabilität der Gorleben-Bank (z2OSM) und der angrenzenden Schichten Permeabilitäten kleiner als 10^{-20} m^2 . Diese erhöhten Permeabilitäten in der Leine-Folge (z3) sind lokal begrenzt und nicht als Materialkennwert für die jeweilige stratigraphische Einheit anzusetzen.

Im Übergangsbereich z2/z3 wurde in der Bohrung 02YEQ02 RB815 eine Permeabilität kleiner als 10^{-20} m^2 ermittelt.

In einigen Einzelmessungen innerhalb der Staßfurt- und Leine-Folge konnten erhöhte Permeabilitäten gemessen werden (Abb. 4). Die Bereiche, welche durch eine erhöhte Permeabilität charakterisiert sind, befinden sich meist in stark deformierten Schichten, die weniger durch Sekundärmineralisationen verfüllt sind. Die Mächtigkeit dieser Bereiche beträgt meist wenige Meter. Generell erweist es sich als schwierig, den verschiedenen stratigraphischen Einheiten einen allgemeingültigen Permeabilitätswert zuzuschreiben, da die Permeabilität innerhalb einer stratigraphischen Einheit entsprechend dem geologischen Aufbau, der Mächtigkeit des Vorkommens und den gebirgsmechanischen Verhältnissen sehr stark variiert und daher lokationsbezogen zu betrachten ist.

Auf der Grundlage von Messungen zur hydraulischen Charakterisierung der Gorleben-Bank (z3OSM) in drei Bohrungen (01YEA02 RB753, 03YEA02 RB754 und 04YEA01 RB755) wurden Permeabilitäten kleiner als 10^{-20} m^2 ermittelt. In einzelnen Messlokalen wurden geringe Druckzunahmen und Druckschwankungen von wenigen hundert Millibar erfasst, die auf geringe Gas- und Lösungszutritte zurückgeführt werden. In der Bohrung 01YEA02 RB753 konnte der Austritt von Kondensat am Bohrlochmund beobachtet werden. Die in die Bohrung zugetretenen Gas- bzw. Lösungsmengen waren jedoch so gering, dass bei einer Wiederholungsmessung nach fünf Monaten kein Druckaufbau gemessen und keine Lösungsaustritte aus der Bohrung zu beobachten waren.

Im Rahmen der KW-Untersuchungen wurden im Querschlag 1 West und Querschlag 1 Ost über 40 KW-Kurzbohrungen gestoßen, von denen in 21 Bohrungen Permeabilitätsmessungen zur hydraulischen Charakterisierung des Nahbereichs der Strecken durchgeführt wurden. Mit diesen Messungen wurden ausschließlich das Knäuelsalz (z2HS1) und das Streifensalz (z2HS2) der Staßfurt-Folge (z2) erfasst. Generell ist eine deutliche Abnahme der Permeabilität mit zunehmendem Abstand zum Grubenraum festzustellen. In unmittelbarer Konturnähe der Strecken, in einem Abstand von wenigen Dezimetern,

wurden Permeabilitäten von bis zu 10^{-13} m^2 bestimmt. Die Permeabilitäten nehmen mit zunehmendem Abstand ab und erreichen in einer Entfernung von 2,5 m zum Stoß Werte von $> 10^{-20} \text{ m}^2$. Ab einem Abstand von 2,5 m zum Stoß wurden Permeabilitäten $< 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt.

Vor dem Moratorium wurden bereits in zwei Bohrungen (RB381 und RB383) in der Richtstrecke 3 Ost Permeabilitätsmessungen im Nahbereich durchgeführt. In diesen wurden keine nennenswert erhöhten Permeabilitäten bestimmt (NOWAK & WEBER 2002).

Die Bestimmung der Lokations- und Richtungsabhängigkeit der Permeabilität im Nahbereich der Grubenräume in den sogenannten Permeabilitätsmessquerschnitten auf der 840-m-Sohle konnte wegen des Erkundungsstopps nicht durchgeführt werden.

In den KW-Kurzbohrungen im Querschlag 1 Ost und im Querschlag 1 West wurden zusätzlich Permeabilitätsmessungen in KW-imprägnierten Bereichen durchgeführt. Bei diesen Messungen wurden gering ansteigende und schwankende Druckverläufe oder auch verlangsamte Druckabfallraten beobachtet, die auf geringe KW-Zutritte zurückzuführen sind. Wiederholungsmessungen in diesen KW-imprägnierten Bereichen zur Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Permeabilität konnten aufgrund des Erkundungsstopps nicht abgeschlossen werden, so dass eine abschließende Aussage zu den Permeabilitätsänderungen nicht erfolgen kann.

Ein anderer wesentlicher Schwerpunkt der felshydraulischen Untersuchungen ist die In-situ-Quantifizierung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen. Hierzu sind 20 sogenannte KW-Packerbohrungen im Knäuel- und Streifensalz (z2HS1 und z2HS2) im Querschlag 1 West und Querschlag 1 Ost sowie in den Bohrorten 1.2, 3.1 und 5 erstellt und mit einem Packersystem instrumentiert worden. Das eingesetzte Messsystem ermöglicht neben der Beobachtung der Druckentwicklung im Messintervall auch die Probenahme von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen.

In der Mehrzahl der Bohrungen erfolgte für die jeweilige Messdauer bis Ende 2012 nur ein sehr geringer ($< 0,3 \text{ bar}$) bzw. geringer ($< 10 \text{ bar}$) Druckaufbau. Nur drei (alle im Querschlag 1 West gelegen) der zwanzig KW-Packerbohrungen weisen einen sehr intensiven Druckaufbau verbunden mit häufig notwendigen Druckentlastungen auf, der auch nach rund zwei Jahren unverändert hoch ist. Aus den bisherigen Messergebnissen lässt sich ein Volumen der aufgeschlossenen KW-Vorkommen von wenigen Kubikmetern abschätzen. Eine abschließende Quantifizierung der KW-Vorkommen kann jedoch aufgrund der noch nicht abgeschlossenen Druckaufbauphasen und des Abbruchs der Messungen nicht erfolgen.

Eine gegenseitige Beeinflussung der Druckentwicklungen in benachbarten Bohrungen konnte im Beobachtungszeitraum selbst bei einem geringen Bohrungsabstand von 0,6 m nicht beobachtet werden. Nach bisherigem Kenntnisstand sind die aufgeschlossenen KW-Vorkommen daher voneinander isoliert. Migrationsprozesse der Kohlenwasserstoffe finden im unverritzten Gebirge aufgrund der geringen Permeabilität der Steinsalzsichten nicht statt.

Literaturverzeichnis

- AMELUNG P. & SCHUBERT J. (2000): Dokumentation der Kondensatvorkommen im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (AP 9G4413000). – 16 S., 1 Anhang, 9 Anlagen; Gorleben/Peine (DBE).
- BÄUERLE, G., MENGEL, K. & BORNEMANN, O. (2000): Lösungs- und Gasführung Gorleben-Bank; Abschlussbericht. 255 S., 34 Abb., 24 Tab., 27 Anl., Hannover.
- BORNEMANN, O., Behlau, J., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2003): Projekt Gorleben – Standortbeschreibung Gorleben – Teil III, Ergebnisse der Erkundung des Salinars.– BGR, Archiv-Nr. 0124403: 222 S., 6 Tab., 30 Abb., 4 Anl., 1 Beil.; Hannover.
- DBE (2013): Übersichtsriss Gorleben, EB1-840-m-Sohle (Stand 10.04.2013)
- HAMMER, J., PUSCH, M., HÄGER, A., OSTERTAG-HENNING, C., SCHLÖMER, S., MINGERZAHN, G., SCHEEDER, G., SHAO, H., PAUL, B., SCHULZE, O., & HESSER, J. (2013): Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben - Zwischenbericht 2012 (AP 9GE332300000). - in Vorbereitung; Hannover (BGR).
- HAMMER, J., FLEIG, S., MINGERZAHN, G., KÜHNLENZ, T., SCHRAMM, M., PUSCH, M., BEHLAU, J., ZARETZKI, B., HESSER, J., SHAO, H., KÖTHE, A. & VOGEL, P. (2012a): Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben – GRS / 273 ISEB 978-3-939355-49-6; Köln (GRS).
- HAMMER, J., PUSCH, M., HÄGER, A., OSTERTAG-HENNING, C., SCHLÖMER, S., MINGERZAHN, G., SCHEEDER, G., SHAO, H., PAUL, B., SCHULZE, O., ZARETZKI, B. & HESSER, J. (2012b): Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben - Zwischenbericht 2011 (AP 9GE332300000). – 236 S. 107 Abb., 17 Tab., 3 Anhänge; Hannover (BGR).
- NOWAK, T. & WEBER, J. R. (2002): Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben, Abschlussbericht (AP 9G4151110000). -122 S., 57 Abb., 16 Tab.; Hannover (BGR).
- PAUL, B., HESSER, J., NOWOTNY, D., HOFFMANN, S. & SANCHEZ-HERRERO, S. (2013): Geotechnische Instrumentierung und Messungen der BGR 2012 - Zwischenbericht (AP 9GE331100000). – 242 S., 4 Abb., 12 Tab., 7 Anhänge; Hannover (BGR).

- PAUL, B.; HESSER, J., KUNZ, H., LEGE, C., FLENTJE, R., NOWOTNY, D. & SANCHEZ-HERRERO, S. (2012): Geotechnische Instrumentierung und Messungen der BGR: Stand 2011 (AP 9GE331100000). – 156 S., 13 Abb., 3 Tab., 5 Anhänge; Hannover (BGR).
- PAUL, B., HESSER, J. & SHAO, H. (2013): Geotechnische Instrumentierung und Messungen der BGR. Abschlussbericht zum AP 9G E331100000, in Vorbereitung.
- STORMONT, J. C., HOWARD, C. L. & DAEMON, J. J. (1991): In Situ Measurements of Rock Salt Permeability changes due to Nearby Excavation. - Sandia Report SAND90-3134; Albuquerque (Sandia National Laboratories).
- WEBER, J. R. & WALLNER, M. (1998): Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben, Abschlussbericht (AP 9M2131003100). – 98 S., 90 Abb., 31 Tab.; Hannover (BGR).
- WEBER, J. R. (1999): Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben, 1. Zwischenbericht: Erarbeitung eines Versuchskonzeptes für Bohrlochtests zur Permeabilitätsbestimmung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover, Archiv-Nr. 118774.
- ZARETZKI, B., SHAO H. & HESSER, J. (2012): Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche: Permeabilitätsmessungen – Stand 2011 – Ergebnisbericht (AP 9GE431100000). – 123 S., 46 Abb., 8 Tab., 2 Anhänge; Hannover (BGR).
- ZARETZKI, B., SHAO H. & HESSER, J. (2013): Geotechnische Bewertung der Erkundungsbereiche: Permeabilitätsmessungen – Stand 2012 – Ergebnisbericht (AP 9GE431100000). – 156 S., 89 Abb., 22 Tab., 2 Anhänge; Hannover (BGR).

Abkürzungsverzeichnis

AP:	Arbeitspaket
BfS:	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
BGR:	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
DBE:	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH, Peine
KW:	Kohlenwasserstoff
stdl:	Standard-Liter
z2:	Staßfurt-Folge
z2HG:	Hangendsalz, Staßfurt-Folge
z2HS:	Hauptsalz, Staßfurt-Folge
z2HS1:	Knäuelsalz, Hauptsalz, Staßfurt-Folge
z2HS2:	Streifensalz, Hauptsalz, Staßfurt-Folge
z2HS3:	Kristallbrockensalz, Hauptsalz, Staßfurt-Folge
z2SF:	Kaliflöz Staßfurt, Staßfurt-Folge
z2UE:	Kieseritische Übergangsschichten, Staßfurt-Folge
z3:	Leine-Folge
z3BK/BD:	Bank-/Bändersalz, Leine-Folge
z3BS:	Basissalz, Leine-Folge
z3GT:	Grauer Salzton, Leine-Folge
z3HA:	Hauptanhydrit, Leine-Folge
z3LS:	Liniensalz, Leine-Folge

- z3OS: Orangesalz, Leine-Folge
- z3OSM: Gorleben-Bank, Mittleres Orangesalz, Leine-Folge
- z3OSO: Oberes Orangesalz, Leine-Folge
- z3OSU: Unteres Orangesalz, Leine-Folge

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Übersicht zu den stratigraphischen Einheiten, in denen Permeabilitätsmessungen durchgeführt wurden.....	10
Tab. 2: Menge der flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffe in den Bohrungen RB685, RB688 und RB689 unter Normbedingungen bis zum Verschließen der Bohrungen am 27.02.2014.....	29

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Lage der geologischen Erkundungsbohrungen RB639, RB815 und RB255 sowie des Querschlags 1 West und Querschlags 1 Ost mit Bohrort 5 im Sohlriss der 840-m-Sohle (PAUL et al. 2013).....	9
Abb. 2: Lage der Bohrung 02YEQ02 RB815 auf der 840-m-Sohle (links) und auf der 880-m-Sohle (rechts) (DBE 2012).....	13
Abb. 3: Lage der Gorleben-Bank-Bohrungen 01YEA02RB753, 03YEA02RB754 und 04YEA01RB755 mit jeweils zwei Gorleben-Bank-Durchgängen (gelbe Kugeln) (geänderte Darstellung aus HAMMER et. al., 2012a).....	15
Abb. 4: Zusammenfassende Darstellung der maximal gemessenen Permeabilität in den verschiedenen stratigraphischen Einheiten (blauer Balken – Messungen mit Stickstoff; roter Balken – Messungen mit Lauge).....	17
Abb. 5: Geplanter Bohrungsquerschnitt für die Untersuchung im Nahfeld.....	18
Abb. 6: Lage der KW-Erkundungskurzbohrungen im Querschlag 1 West, rot hervorgehoben sind die für die Permeabilitätsmessungen ausgewählten Bohrungen (DBE 2013).....	19
Abb. 7: Permeabilitätsverteilung im Nahfeld des Querschlags 1 West (alle Bohrungen).....	20
Abb. 8: Lage der KW-Kurzbohrungen RB663 bis RB682 im geologischen Riss, rot hervorgehoben sind die für die Permeabilitätsmessungen ausgewählten Bohrungen (DBE 2013).....	21
Abb. 9: In der ersten Messkampagne im Querschlag 1 Ost und in der RB681 ermittelte Permeabilitäten.....	22
Abb. 10: Permeabilitätsverteilung im Nahfeld der Grubenbaue (nach NOWAK & WEBER 2002).....	25
Abb. 11: KW-Packerbohrungen im Querschlag 1 West (links) und Querschlag 1 Ost (rechts) (Ausschnitt aus DBE 2013).....	27
Abb. 12: Kumulatives Volumen gasförmiger und flüssiger KW aus der Bohrung RB688 (bis zum 27.02.2014) unter Normbedingungen.....	29
Abb. 13: UV-Profil, Lokation, Anordnung und Druckaufbaumessungen der RB689 und der RB691.....	31