

Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage

Titel: **Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben**

Autor: **BGR**

Erscheinungsjahr: **1998**

Unterlagen-Nr.: **P 071**

Revision: **00**



Bundesamt für Strahlenschutz

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	5
2	Bearbeitungskonzept	5
2.1	Benennung permeabilitätsrelevanter Kriterien	5
2.1.1	Gesteinsart	5
2.1.2	Mechanische Beanspruchung	6
2.1.3	Zeiteffekte	6
2.1.4	Strömungsmedium	7
2.1.5	Lokale Besonderheiten	7
2.2	Auswahl von Lokationen für Permeabilitätsmessungen	7
3	Durchführung von Permeabilitätsmessungen	12
3.1	Versuchsmethodik	12
3.1.1	Testfluid	12
3.1.2	Testart	13
3.1.2.1	Constant Rate Test	13
3.1.2.2	Pulstest	15
3.2	Versuchsausrüstung	16
3.2.1	Doppelpacker	16
3.2.2	Testausrüstung für Kurzbohrungen	18
3.3	Testdurchführung	18
3.4	Testauswertung	20
3.4.1	Pulstest	20
3.4.1.1	Aufbereitung gemessener Druckverläufe	20
3.4.1.2	Berechnung von Druckverläufen	25
3.4.1.3	Anpassung berechneter Druckverläufe	28
3.4.2	Constant Rate Test	29
4	Ergebnisse	31
4.1	Testergebnisse	31
4.1.1	Intervalltests mit Doppelpackern	31
4.1.1.1	Bohrungen RB 522, 523 und 524	36
4.1.1.2	Bohrungen RB 525, 526 und 527	41

4.1.1.3	Bohrungen RB 528, 529 und 530	44
4.1.1.4	Bohrungen RB 531, 532, 533 und 534	50
4.1.1.5	Bohrungen RB 538, 539 und 540	53
4.1.1.6	Bohrungen RB 541 und 542	57
4.1.1.7	Bohrungen RB 543, 544, 545 und 546	60
4.1.1.8	Bohrungen RB 509, 510, 511 und 512	64
4.1.1.9	Tests im Ostfeld	65
4.1.2	Tests in Kurzbohrungen	69
4.1.3	Tests mit Salzlösung	82
4.1.3.1	Steinsalz	82
4.1.3.2	Salzton	85
4.1.3.3	Anhydrit	87
4.2	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	87
4.2.1	Zusammenfassung der Ergebnisse nach permeabilitätsrelevanten Kriterien	88
4.2.1.1	Mechanische Beanspruchung	88
4.2.1.2	Gesteinsart	89
4.2.2	Vergleich mit Labormessungen an Kernproben	91
4.2.3	Vergleich mit Literaturangaben	92
4.3	Räumliche Extrapolation der Meßergebnisse	92
5	Zusammenfassung	96
6	Literaturverzeichnis	98

Gesamtblattzahl: 98

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren: Jan Richard Weber / Manfred Wallner

Titel: Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben
Abschlußbericht

Stichworte: Permeabilität, Auflockerung, Steinsalz, Anhydrit, Morsleben

Im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben wurden Bohrlochtests zur Bestimmung der Permeabilität der salinaren Gesteine durchgeführt. Die Tests weisen nach, daß Steinsalz im unverritzten Zustand keine höhere Durchlässigkeit als 10^{-20} m^2 besitzt. Dieses Resultat wird sowohl mit Gas als auch mit Salzlösung als Strömungsmedium erzielt. In aufgelockerten Gebirgsbereichen werden Permeabilitäten bis über 10^{-15} m^2 festgestellt. Eine Auflockerung des Gebirges tritt ein, wenn seine Dilatanzgrenze überschritten wird. Eine Entlastung des Gebirges gegenüber dem unverritzten Zustand ohne Überschreitung der Dilatanzgrenze bewirkt keine Erhöhung der Permeabilität. Schweben sind stärker von Auflockerungen erfaßt als Pfeiler. Die Auflockerungszonen um Einzelhohlräume sind um Strecken weniger als 1 m und um Abbaukammern bis 2 m mächtig. In Hohlraumnahbereichen werden in Teufen um 20 cm Permeabilitäten bis 10^{-15} m^2 angetroffen. Salzton besitzt für Gas keine Durchlässigkeit größer als 10^{-20} m^2 und ist für Lösungen geringpermeabel im Bereich 10^{-18} m^2 bis 10^{-19} m^2 . Der Anhydrit ist heterogen ausgebildet. Er besitzt in kompakten Bereichen keine höhere Durchlässigkeit als 10^{-20} m^2 . In geklüfteten Bereichen treten Permeabilitäten bis über 10^{-13} m^2 auf.

1 Zielsetzung

Das Arbeitspaket 9M 213 100 31 "Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben" verfolgt das Ziel, das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben ERAM hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften seiner geologischen Barriere zu charakterisieren. Als Ergebnis der Untersuchungen sind undurchlässige und permeable Gebirgsbereiche in ihrer räumlichen Verteilung zu identifizieren und die auftretenden hydraulischen Leitfähigkeiten zu quantifizieren. Dabei wird als Maßzahl für die hydraulische Leitfähigkeit die Permeabilität verwendet.

2 Bearbeitungskonzept

Zur Messung der Permeabilität eines Gesteins im Gebirgsverband sind hydraulische Bohrlochtests in situ geeignet. Hydraulische Bohrlochtests erfassen einen begrenzten Gebirgsbereich, der um so kleiner ist, je geringer die Permeabilität des Gesteins ist. Für die geringpermeablen Salzgesteine des ERAM stehen Eindringtiefen hydraulischer Bohrlochtests im Dezimeterbereich einer Ausdehnung des zu charakterisierenden Gebirgsbereiches im Kilometerbereich gegenüber, so daß es nicht möglich ist, für jeden beliebigen Ort im Grubengebäude einen gemessenen Permeabilitätswert anzugeben. Deshalb werden permeabilitätsrelevante Kriterien benannt, anhand derer gemessene Permeabilitätswerte auf größere Gebirgsbereiche extrapoliert werden können.

Unterschiede zwischen Permeabilitätswerten haben außerhalb des Wertebereichs 10^{-15} m^2 bis 10^{-20} m^2 keine oder nur vernachlässigbare Unterschiede in der Barrierewirkung des Gesteins zur Folge. Deshalb werden Permeabilitäten außerhalb dieses Wertebereichs pauschal mit $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ oder $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ angegeben.

2.1 Benennung permeabilitätsrelevanter Kriterien

Die folgenden Abschnitte 2.1.1 bis 2.1.5 zeigen, daß als permeabilitätsrelevante Kriterien die Gesteinsart und die mechanische Beanspruchung zu berücksichtigen sind.

2.1.1 Gesteinsart

Bestimmend für die Permeabilität eines Gesteins sind die Häufigkeit, der Vernetzungsgrad und die geometrische Ausbildung der im Gestein vorhandenen Hohlräume. Vernetzte und damit wegsame Hohlräume kommen als intergranulare Wegsamkeiten zwischen den einzelnen Mineralkörnern oder als Korngrenzen durchschlagende Risse bzw. Klüfte oder als Mischform vor. Vernetzte intergranulare Wegsamkeiten kommen in Gesteinen, die aufgrund ihres Chemismus Rekristallisationsvorgänge begünstigen, seltener vor als in chemisch-kristallographisch stabilen Gesteinen. Hydraulisch leitfähige Risse und Klüfte als Resultat tektonischer Beanspruchungen in der Vergangenheit treten in spröden Gesteinen häufiger auf als in kriechfähigen Gesteinen. Folglich sind für unterschiedliche Evaporitgesteine unterschiedliche Permeabilitäten zu erwarten, wenn sich die betrachteten Evaporitgesteine in ihrem Korngefüge, ihrem Chemismus oder ihrem mechanischen Materialverhalten unterscheiden.

Unter den im ERAM aufgeschlossenen Evaporitgesteinen hebt sich hinsichtlich Korngefüge und Chemismus der Salton als teilweise klastisches Sediment mit nennenswerten Silikatanteilen von den chemischen Sedimentgesteinen ab. Im mechanischen Materialverhalten unterscheidet sich der spröde Anhydrit von den kriechfähigen Salzgesteinen, in der Hauptsache Steinsalz und Carnallit. Folglich müssen für die hydraulische Charakterisierung des ERAM aufgrund

der dargelegten permeabilitätswirksamen Unterschiede die folgenden Gesteinsarten unterschieden werden:

- Salzgestein,
- Anhydrit und
- Salzion.

Eine weitere Untergliederung der chloridischen Salzgesteine nach ihrer Wasserlöslichkeit, z.B. in Steinsalz und Carnallit, ist nicht sinnvoll, da die Löslichkeit nur indirekt permeabilitätswirksam sein kann, indem sie geochemische Prozesse beeinflusst, nicht aber den hydraulischen Ist-Zustand des Gebirges.

2.1.2 Mechanische Beanspruchung

Durch das Auffahren untertägiger Hohlräume werden das primäre Spannungsfeld im Gebirge verändert und entsprechende Verformungen hervorgerufen. Im allgemeinen erfolgt diese Kriechverformung des Salzgesteins volumentreu. Bei geringen isotropen Drücken und vorzugsweise bei Auftreten von Zugspannungen können auch dilatante Verformungen auftreten. Dabei können Mikrorisse gebildet werden. Bestehende Risse können wachsen und sich miteinander vereinigen. Bei Übergang zu höheren isotropen Drücken können Risse wieder geschlossen werden und verheilen.

Da die Durchlässigkeit von Salzformationen an Mikrorisse und ggf. auch Klüfte gebunden ist, sind die Veränderungen im Spannungsfeld permeabilitätswirksam, wenn sie zur Bildung von aufgelockerten Gebirgsbereichen führen, in denen mikroskopische oder makroskopische Risse entstanden sind. Für die hydraulische Charakterisierung muß deshalb hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung zwischen

- unverritztem Gebirge und
- Auflockerungszonen

unterschieden werden. Als Auflockerungszonen werden dabei die Bereiche bezeichnet, in denen sich beim Überschreiten der Dilatanzgrenze Wegsamkeiten gebildet haben. Solche Bereiche liegen bevorzugt:

- An der Grenze von Schichten mit unterschiedlichem Verformungsverhalten,
- in Schweben und Pfeilern und
- hohlraumnah um Einzelhohlräume.

Gebirgsbereiche, in denen eine Entlastung des Gebirges gegenüber dem petrostatischen Druck vorliegt, ohne daß dabei die Dilatanzgrenze überschritten wird, gehören nicht zu den Auflockerungszonen (vgl. Abschnitt 4.2.2).

2.1.3 Zeiteffekte

Die Kriechfähigkeit des Salzes bedingt, daß eine Änderung des Spannungszustandes zu einem zeitabhängigen Deformationsvorgang (Kriechen) führt, so daß auch die Ausbildung permeabler Auflockerungszonen zeitabhängig ist.

Dem hier verfolgten Konzept liegt zugrunde, daß die ursprüngliche Dichtigkeit des Gebirges erhalten bleibt, solange sich nicht durch das Auftreten von dilatanten Verformungen bzw. Zugspannungen Auflockerungszonen bilden. Wenn die Korrelierbarkeit der Permeabilität mit der Ausdehnung der Auflockerungszonen gegeben ist, braucht die zeitliche Entwicklung der Permeabilität nicht in situ untersucht zu werden, da sie sich aus den Ergebnissen der FE-Berechnungen als zukünftige Entwicklung der Auflockerungszonen ablesen läßt.

2.1.4 Strömungsmedium

Die aus den verschiedenen Viskositäten resultierenden Unterschiede in den Fließraten von Gas- und Flüssigkeitsströmungen werden rechnerisch berücksichtigt und haben keine Auswirkung auf die ermittelte Permeabilität.

Dagegen beeinflussen die unterschiedlichen Mobilitäten der an einer Porenwand anliegenden Fluidschicht die Permeabilität: Während in Flüssigkeitsströmungen die Geschwindigkeit der an der Porenwand anliegenden Flüssigkeitsschicht Null ist, gleitet die entsprechende Gasschicht an der Porenwand entlang. Das führt zu einer Erhöhung der Fließrate je Porenquerschnittsfläche. Die Zunahme der Fließrate ist signifikant in Poren, deren Öffnungsweite in der Größenordnung der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle liegt.

In Wasserströmungen bildet sich aufgrund des Dipolcharakters der Wassermoleküle i.a. eine Haftwasserschicht aus, die den für die Fluidkonvektion zur Verfügung stehenden Porenquerschnitt verringert und die Fließrate gegenüber Gasströmungen herabsetzt.

Die genannten vom strömenden Medium abhängenden Phänomene bewirken lediglich graduelle Permeabilitätsänderungen. Gegenüber den durch Variation der mechanischen Beanspruchung verursachten Permeabilitätsänderungen um mehrere Größenordnungen sind sie von geringer Bedeutung und werden hier nicht betrachtet.

Kapillareffekte können bei mehrphasiger Sättigung des Porenraums Strömungsvorgänge beeinflussen. Damit die Messung von Permeabilitäten nicht durch eine Mehrphasensättigung des Porenraums erschwert wird, werden die Testfluide entsprechend den initial vorhandenen Fluiden ausgewählt (vgl. Abschnitt 3.1.1).

Auswirkungen auf die Permeabilität, die sich ergeben, wenn der Porenraum durch Wechselwirkungen mit dem Strömungsmedium wie Lösungs- oder Ausfällungsvorgänge oder Tonquellung verändert wird, sind, wie schon in Abschnitt 2.1.1 ausgeführt, für die Beschreibung des hydraulischen Ist-Zustandes des Gebirges nicht von Interesse.

2.1.5 Lokale Besonderheiten

Bereiche, denen durch ihre exponierte Lage eine besonders wichtige Funktion innerhalb des Barriersystems zukommt, machen eine besondere Betrachtung erforderlich. Als exponiert sind die am Salzstrukturrand liegenden Grubenbaue des Westfeldes sowie die in großer Nähe zum Salzspiegel befindlichen Abbaue der Hauptmulde zu bezeichnen. Aufgrund der an diesen Stellen geringen Mächtigkeit der Salzbarriere haben Unsicherheiten/Streubreiten in den Permeabilitätsangaben hier den größten Einfluß auf Aussagen zur Nuklidausbreitung. Diese lokale Besonderheit bestimmt damit die Einschätzung der Barrierewirkung. Sie hat aber keinen Einfluß auf die Permeabilität des anstehenden Gesteins, stellt also kein bei der Planung der erforderlichen in situ Tests zu berücksichtigendes Kriterium dar. Gleiches gilt für bekannte Schwachstellen.

2.2 Auswahl von Lokationen für Permeabilitätsmessungen

Die Permeabilitätsmessungen werden als hydraulische Bohrlochtests an solchen Orten durchgeführt, an denen einzelne permeabilitätsrelevante Kriterien in ausgeprägter Weise vorliegen. Die gemessenen Permeabilitäten werden entsprechend dem Vorliegen der permeabilitätsrelevanten Kriterien großräumig auf das Grubengebäude übertragen. In welcher Weise die Kriterien an einem betrachteten Ort im Grubengebäude vorliegen, ergibt sich aus der geologischen Beschreibung des Grubengebäudes und den Berechnungen zur Gebirgsmechanik (s. Abschnitt 4.3).

Da im Untersuchungskonzept eine Abhängigkeit der Permeabilität von der Gesteinsart und vom Spannungszustand, nicht aber von der jeweiligen Feldesbezeichnung angenommen wird, war eine gleichmäßige Verteilung der Testbohrungen auf die zu charakterisierenden Feldesbereiche nicht erforderlich. Vielmehr konnten die Lokationen so ausgewählt werden, daß sie die Kriterien Gesteinsart und/oder Belastungszustand repräsentativ erfassen. Gleichzeitig wurde sichergestellt, daß örtliche Erschwernisse wie schlechte Zugänglichkeit oder unzureichende Infrastruktur den Fortgang der Arbeiten nicht behindern.

Das ERAM liegt in der Salzstruktur Allertal und schließt die Staßfurt- und Leineserie der salinaren Abfolge auf. Die an den Flanken mehrerer Sättel und Mulden steil aufgerichteten Schichten folgen in ihrem Streichen der NNW-SSO-Erstreckung des Allertalgrabens, so daß die W-O gerichteten söhligen Strecken unterschiedliche Schichten durchörtern. Für den Aufschluß der einzelnen Gesteinsgruppen geeignete Bohrlokationen sind daher vorwiegend entlang der Querschläge zu finden.

Der Salzton kann von Abbauen aus nur über relativ lange Bohrungen erreicht werden. Ausnahmen bilden die Abbau 4 der 2. Sohle und der 2a Sohle, wobei der Abbau 4 der 2. Sohle nicht zugänglich ist und die Lagerungsverhältnisse östlich des Abbaus 4 der 2a Sohle unklar sind, da der Salzton nicht bis zur darüberliegenden 1. Sohle ausstreicht. Die Bohrungen zum Aufschluß des Salztons mußten deshalb in Strecken angesetzt werden. Ausgewählt wurde eine Streckenerweiterung im Ostquerschlag der 2. Sohle im Bereich des Kali-Lagers Teil C. Hier wurden die Bohrungen RB 522, 523 und 524 im grauen Salzton bzw. im Carnallit angesetzt. Sie erreichen bei horizontaler Ausrichtung nach NW nach einigen Metern den Anhydrit (Abbildung 1).



Abbildung 1: Ostquerschlag 2. Sohle, Lage der Bohrungen RB 522 - RB 527¹

Eine weitere Bohrung im Salzton (Bohrung LBt, s. Abbildung 2) wurde auf der 3. Sohle vom Flachen 2 aus erstellt.

¹ Die Darstellungen zur Lage der Bohrungen basieren auf dem Reißwerk zu BEHLAU, J., MINGERZAHN, G. & BORNEMANN, O. (1997): Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben, BGR Hannover, Archiv-Nr. 116872, unveröffentlicht.

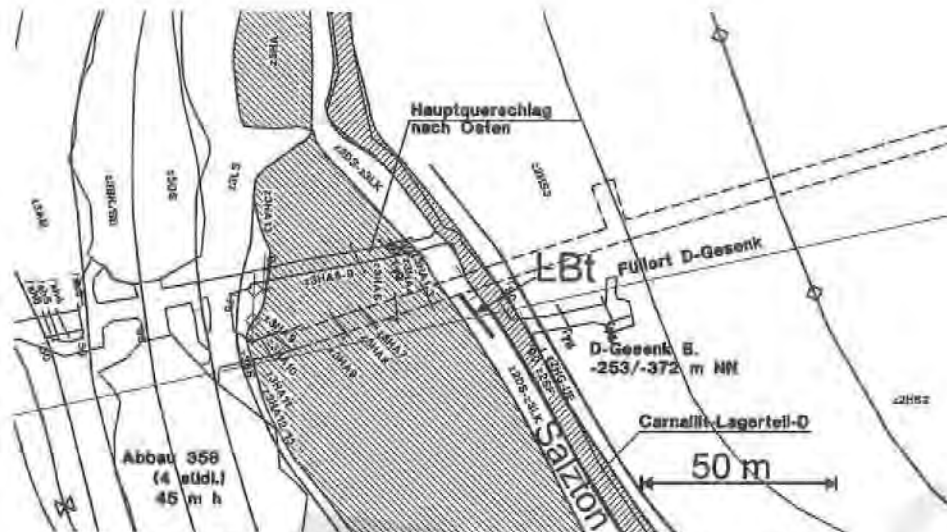


Abbildung 2: Flächen 2, 3. Sohle, Lage der Salztun-Bohrung LBT

Die unterschiedlichen Typen von Auflockerungszonen im Salzgestein lassen sich in der Hauptmulde wegen des dort hohen Durchbauungsgrades gut untersuchen.

Die auf der 2. Sohle im Abbau 2 nördl. erstellten Bohrungen RB 525, 526 und 527 durchdrern das Steinsalz und erreichen den Anhydrit (Abbildung 1). In diesen Bohrungen wird die Permeabilität an der Grenze von Schichten mit unterschiedlichem Verformungsverhalten untersucht. In Kombination mit den Bohrungen RB 522, 523 und 524 bietet sich hier die Korrelationsmöglichkeit der Messungen im Anhydrit.

Dieser Typ der Auflockerungszonen wird in einer weiteren Lokation untersucht. Dazu wurden im Abbau 1 südl. der 2. Sohle die Bohrungen RB 528, 529 und 530 am östlichen Stoß im Steinsalz angesetzt und bis in den Anhydrit geteuft. In Abbildung 3 sind neben den Bohrungen RB 528, 529 und 530 die beiden Kurzbohrungslokalationen BL1A und BL1B (s. u.) eingezeichnet.

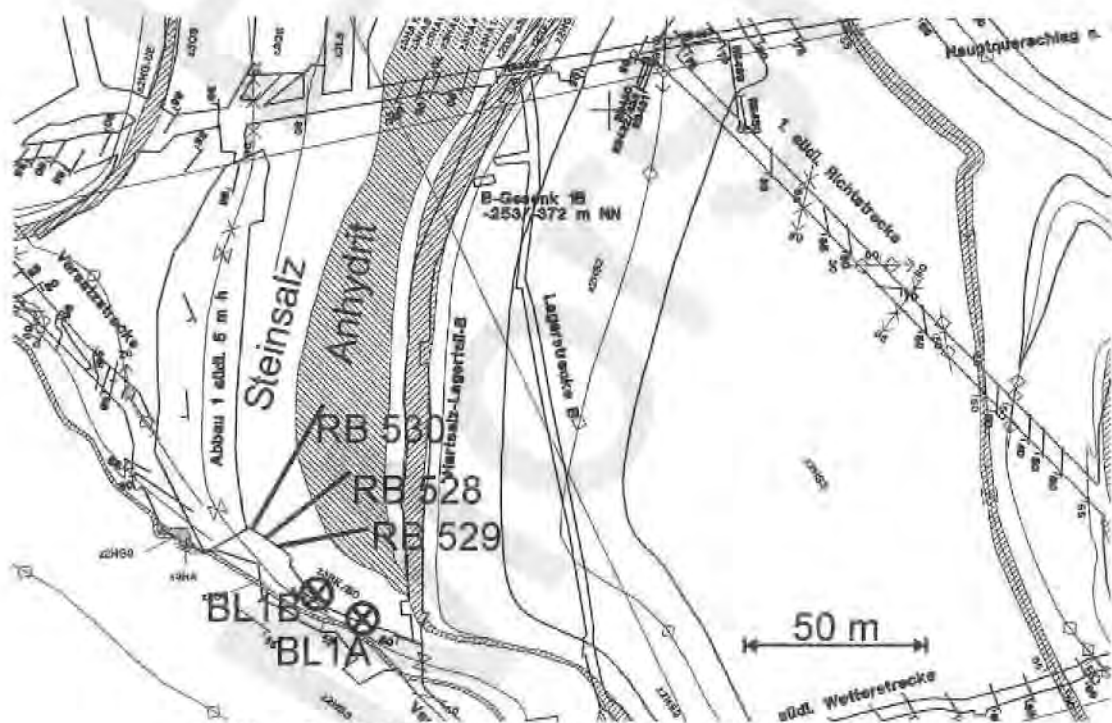


Abbildung 3: 2. Sohle Abbau 1 südl., Lage der Bohrungen RB 528 - 530

Als weiterer Typ der Auflockerungszonen werden Schweben und Pfeiler im Hohlraumssystem durch die Bohrungen RB 531 - 534 auf der 2. Sohle untersucht. Für Tests in der Schweben wurden die Bohrungen RB 533 und 534 in das Liegende des Abbaus 1a der 2. Sohle in Richtung des darunterliegenden Abbaus der 3a Sohle geteuft. Die hydraulischen Verhältnisse im Pfeiler werden durch die Bohrungen RB 531 und 532 in den östlichen Stoß des Abbaus 2 nördl. untersucht.

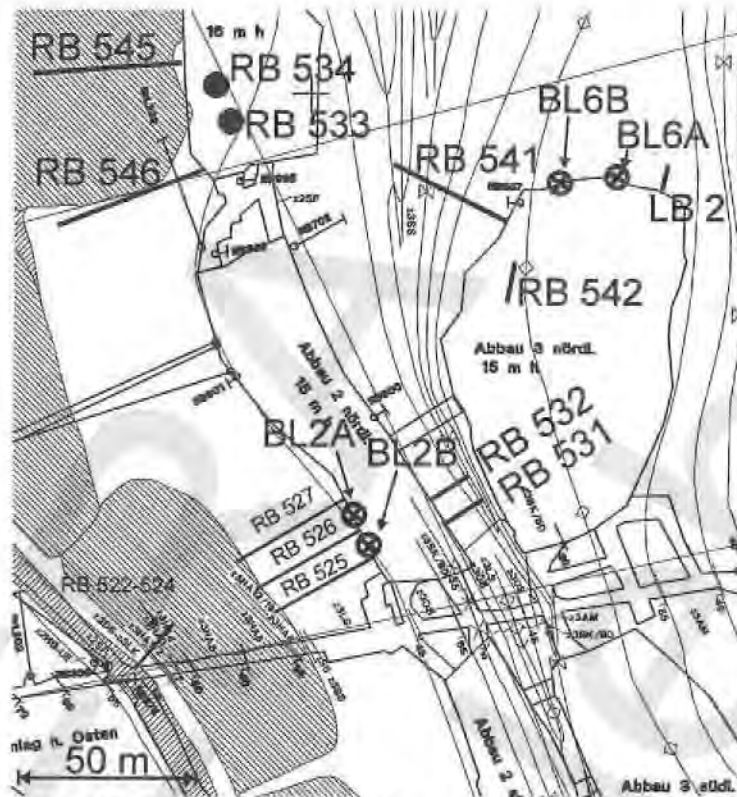


Abbildung 4: 2. Sohle Zentralteil, Lage der Bohrungen RB 531 - 534 und RB 541, RB 542

Die Bohrungen RB 541 und 542 wurden auf der 2. Sohle in die Firste des Abbau 3 nördl. bis zur 1. Sohle geteuft. In der Projektion auf die 2. Sohle in Abbildung 4 erscheinen sie verkürzt. Die Bohrungen verlaufen zwischen der 1. und 2. Sohle in einem Bereich, in dem mehrere Abbauebenen übereinander angeordnet sind. Sie dienen wie die Bohrungen RB 531 - 534 der Erkundung der Permeabilitätsverhältnisse im Schweben- und Pfeilersystem.

Für die Tests im unverritzten Steinsalz finden sich in den Ostquerschlägen der 1. und 2. Sohle im Bereich des Ostsattels gute Bedingungen, da hier die Entfernung zu den nächsten Abbaukammern in allen Richtungen mindestens 100 m beträgt. Die Bohrungen RB 538, 539 und 540 wurden auf der 2. Sohle im Ostsattel mit Bohrungen in den südlichen Stoß angesetzt.

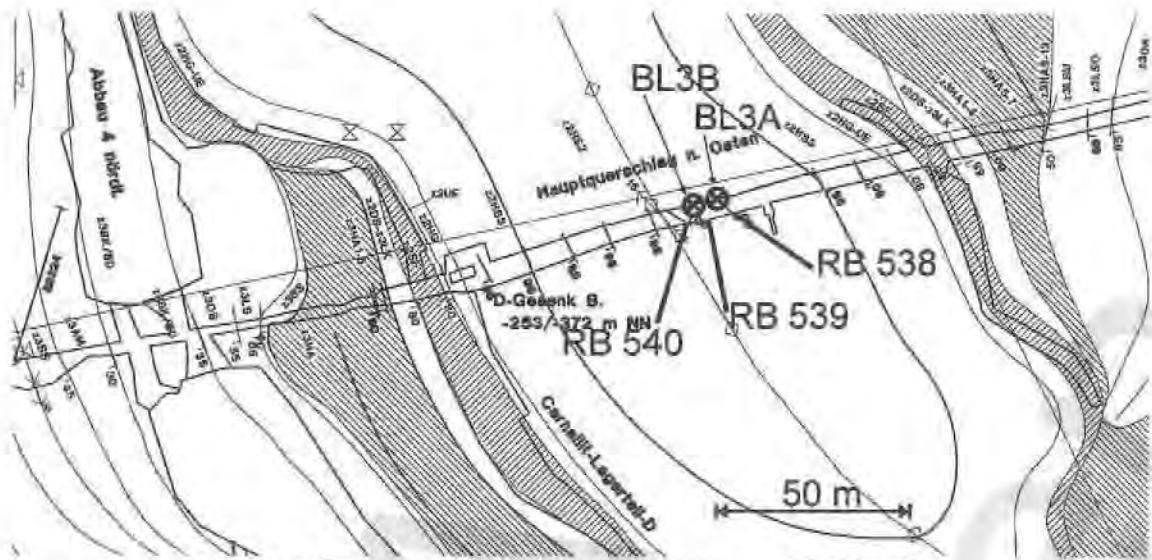


Abbildung 5: Ostquerschlag 2. Sohle, Lage der Bohrungen RB 538 - 540

Die Bohrungen RB 543, 544 und 545 wurden für Tests im Anhydrit erstellt. Die Bohrungen RB 543 und 544 auf der 3. Sohle westlich vom Kali-Lager C im nördlichen Stoß des Ostquerschlags (Abbildung 6) setzen direkt im Anhydrit an.

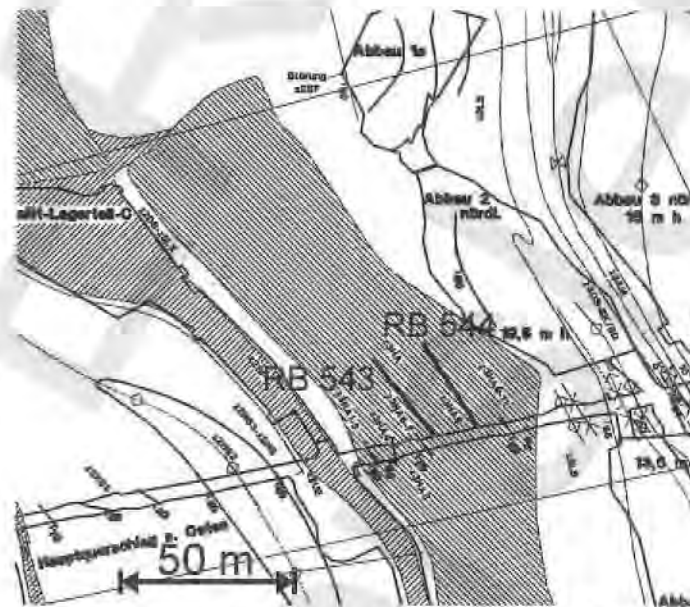


Abbildung 6: Ostquerschlag 3. Sohle, Lage der Bohrungen RB 543 - 544

Die Bohrungen RB 545 und 546 wurden auf der 2. Sohle in den westlichen Stoß des Abbaus 1a geteuft (Abbildung 4). Sie setzen im Steinsalz an. Die Bohrung RB 545 erreicht den Anhydrit in 23 m Teufe. Die Bohrung RB 546 verläuft bis zur Endteufe im Steinsalz.

Zur Charakterisierung der Auflockerungszone um Einzelhöhlräume wurden an mehreren Orten auf der 2. Sohle Kurzbohrungen mit Teufen bis 2 m im Steinsalz erstellt. Die Lage der Kurzbohrungen im Grubengebäude ist in Abbildung 3 (BL1), Abbildung 4 (BL2 und BL6), Abbildung 5 (BL3) und in der folgenden Abbildung 7 (BL4, BL5 und BL7) durch ⊗- Symbole markiert.

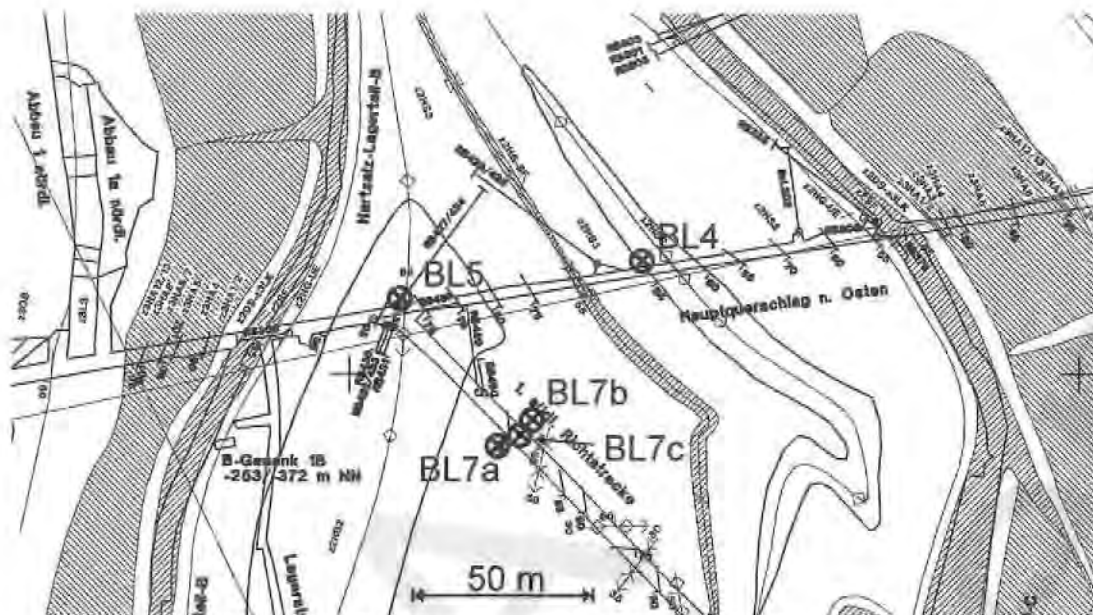


Abbildung 7: 2. Sohle Ostquerschlag und südl. Richtstrecke, Lage der Kurzbohrungslokationen BL4, 5 und 7

Alle Bohrungen wurden als Kernbohrungen mit 86 mm Durchmesser ausgeführt. Die Bohrarbeiten für Doppelpacker-Tests wurden mit DBE-Gerät durch Personal des ERAM ausgeführt. Nach Bohrversuchen mit unterschiedlichen Drehzahlen und Vorschubgeschwindigkeiten wurden zur Schonung der gewonnenen Kerne und der Bohrlochwand die Bohrungen mit 5 cm/min Vorschub und je nach Gesteinsart 70 - 90 Umdrehungen/min geteuft. Als Spülmedium wurde Luft verwendet. Die ingenieurgeologische Aufnahme der Bohrkern erfolgte im Kernlager der BGR. Die Kurzbohrungen wurden von BGR erstellt.

3 Durchführung von Permeabilitätsmessungen

3.1 Versuchsmethodik

Zur Bestimmung von Permeabilitäten in situ können unterschiedliche Arten hydraulischer Bohrlochtests angewandt werden. Das Prinzip der unterschiedlichen Testmethoden besteht darin, ein Fluid bekannter Viskosität und Kompressibilität in den Porenraum der zu testenden Formation zu verpressen oder aus ihm zu entnehmen und den Zusammenhang zwischen der Änderung der Fließrate und dem zeitlichen Druckverlauf zu analysieren. Das Testfluid und die Art des Bohrlochtests müssen abhängig von den jeweils vorliegenden Randbedingungen ausgewählt werden.

3.1.1 Testfluid

Als Testfluid können Flüssigkeiten oder Gase verwendet werden. Wenn im Porenraum des zu untersuchenden Gebirges gleichzeitig Gas und Flüssigkeit vorhanden sind, ist zu beachten, daß die Fließraten von sättigungsabhängigen relativen Permeabilitäten bestimmt werden, und daß zusätzlich mehrphasige Verdrängungsprozesse durch Kapillareffekte beeinflusst werden. Die Aussagekraft eines hydraulischen Bohrlochtests wird dadurch verringert. Daher sollten als Testfluide die initial im Porenraum vorhandenen Fluide eingesetzt werden.

Da sich die Auflockerungszonen ausgehend von gasgefüllten Hohlräumen gebildet haben, ist für ihren durchströmbaren Porenraum eine weitgehende Gassättigung anzunehmen. Daher ist Gas als Testmedium für die aufgelockerten Bereiche geeignet.

Laugeneinschlüsse im Salz könnten in den aufgelockerten Bereichen zu einer Teilsättigung mit Lauge führen. Wegen des geringen Wassergehalts des Salzes ist davon auszugehen, daß diese Teilsättigung gering ist. Daher wird die Gasphase als kontinuierliche Phase vorliegen und die Überwindung eines Schwelldruckes bei der Gasinjektion in das Gebirge (s.u.) nicht erforderlich sein. Die effektive Gaspermeabilität ist bei einer geringen Laugensättigung nur wenig von der Einphasen-Permeabilität verschieden. Für Tests in aufgelockerten Bereichen ist daher auch bei Annahme einer partiellen Flüssigkeitssättigung Gas als Testfluid geeignet.

Wegen der zu erwartenden Sättigungsverhältnisse werden die Tests mit Gas durchgeführt. Da keine Restriktionen wegen etwaiger Wechselwirkungen mit der Formationsmatrix bestehen, kann Preßluft verwendet werden.

Um nachzuweisen, daß eine mit Gas als Testmedium ermittelte hinreichende Dichtigkeit des Gebirges nicht durch Kapillareffekte vorgetäuscht ist, wird zusätzlich zu den Gastests je ein Test mit Lösung in Steinsalz, Salzton und Anhydrit durchgeführt.

Bei Existenz eines durchströmbaren Porenraums im unverritzten Salz wäre die Sättigung ungewiß, da Einschlüsse von Gas und Restfeuchte aus der Entstehung des Salzgebirges gleichermaßen angetroffen werden. Bei einer initialen Gassättigung des Porenraums unterhalb der Mobilitätsgrenze muß für die Injektion von Gas in das Gebirge der kapillare Sperrdruck überwunden werden. Ein Injektionsdruck unterhalb des Sperrdruckes würde keinen Gasstrom in das Gebirge erzeugen und so ein undurchlässiges Gebirge vortäuschen. Daher muß bei einer zweiphasigen Sättigung des Porenraums mit diskontinuierlich verteilter Gasphase (Gassättigung unterhalb der Mobilitätsgrenze) sowie bei vollständiger Flüssigkeitssättigung die benetzende Flüssigphase als Testfluid verwendet werden.

3.1.2 Testart

Grundsätzlich sind für die Untersuchungen Testmethoden anzuwenden, die möglichst viele Informationen über die getesteten Gebirgsbereiche liefern. Während Puls- oder Slugtests vorwiegend für die Bestimmung einer mittleren Formationspermeabilität geeignet sind, lassen sich durch Injektions- bzw. Entnahmetests mit konstanter Rate (Constant Rate Test) unterschiedliche Permeabilitäten in aneinandergrenzenden Gebirgsbereichen, z.B. bei einer Schädigung der bohrlochnahen Zone, einfach identifizieren.

Damit aus einem Constant Rate Test die Formationspermeabilität bestimmt werden kann, muß die Testdauer eine bestimmte Mindestdauer übersteigen. Diese Mindestdauer ist der Formationspermeabilität umgekehrt proportional. Deshalb läßt sich in Abhängigkeit von den Testparametern eine Grenzpermeabilität angeben, die innerhalb einer vorgegebenen Testdauer mittels eines Constant Rate Tests noch bestimmbar ist. Um sowohl den Vorteil der kürzeren Testdauer bei Pulstests als auch die erhöhte Aussagekraft von Constant Rate Tests nutzen zu können, wurden in den Untersuchungen beide Testarten kombiniert: Mit einem Pulstest wurde die Permeabilität zunächst grob bestimmt und auf dieser Grundlage entschieden, ob ein Constant Rate Test durchführbar ist oder der Pulstest für eine verfeinerte Auswertung fortgesetzt wird.

3.1.2.1 Constant Rate Test

Bei dieser Testart wird zunächst der Bohrlochabschnitt, in dem der Test durchgeführt werden soll (Testintervall), durch Packer von übrigen Bohrloch hydraulisch getrennt und dann das Testfluid mit konstanter Rate in das Testintervall verpreßt. Ein Beispiel für einen Constant Rate Test zeigt Abbildung 8. In dem hier dargestellten Test, der in der Bohrung RB 528 durchgeführt

wurde, steigt der Druck schnell auf ein Niveau an, das sich dann bei fortgesetzter Injektion kaum noch ändert.

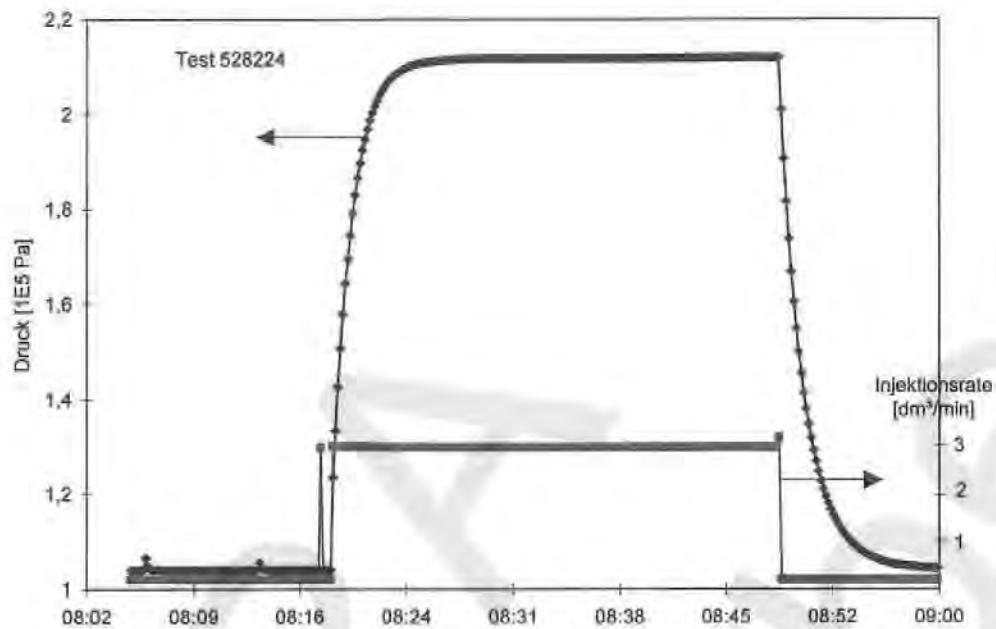


Abbildung 8: Verlauf von Injektionsrate und Druck in einem Constant Rate Test

Dieser Verlauf ist typisch für einen Constant Rate Test in einer hochpermeablen Formation. Der Druck im Bohrloch steht vor der Injektion im Gleichgewicht mit dem Druck im permeablen Gebirgsbereich. Mit dem Beginn der Injektion wird dieses Gleichgewicht gestört, der Druck im Bohrloch steigt und ein Fluidstrom vom Bohrloch in das Gebirge setzt ein. Mit zunehmender Injektionsdauer und steigendem Druck im Bohrloch nimmt der Abfluß in das Gebirge zu, so daß der Druckanstieg abflacht, bis der Bohrlochdruck und der Druck im Nahbereich um das Bohrloch wieder gleich sind. Bis dahin hat die Fluidspeicherung im Bohrloch Einfluß auf den Druckverlauf. Nach dieser Phase der Bohrlochspeicherung wird der weitere Druckverlauf nur noch durch die hydraulischen Eigenschaften des Gebirges bestimmt, so daß aus dem Druckverlauf in dieser zweiten Testphase die Gebirgspermeabilität bestimmt werden kann. Die Dauer der Bohrlochspeicherung beträgt nach RAMEY (1965) für eine Injektionsphase

$$t_{wbs} = 60 \frac{\mu c_g V_w}{2\pi h k}$$

- mit μ - Viskosität des Testfluids
 c_g - Kompressibilität des Testfluids
 V_w - Volumen des Testintervalls
 h - Länge des Testintervalls
 k - Formationspermeabilität.

Für die eingesetzte Testausrüstung ergeben sich Mindesttestdauern von mehreren Wochen für Permeabilitäten unter 10^{-18} m^2 . Constant Rate Tests wurden daher nur in hochdurchlässigen Bohrlochabschnitten mit Permeabilitäten größer als 10^{-17} m^2 durchgeführt.

3.1.2.2 Pulstest

In einem Pulstest wird im abgepackerten Testintervall innerhalb kürzester Zeit ein vom Formationsdruck verschiedener Anfangsdruck eingestellt. Bei geschlossenem Intervall findet dann ein Druckausgleich zwischen Anfangsdruck im Intervall und Formationsdruck statt, der um so langsamer verläuft, je geringer die Permeabilität des Gesteins ist.



Abbildung 9: Verlauf von Injektionsrate und Druck in einem Pulstest

Die erforderliche Dauer eines Pulstests ist abhängig von der Permeabilität des Gesteins. Bei Zugrundelegung der in den Tests vorliegenden Randbedingungen (s. Abschnitt 3.2.1) ergeben sich mit einem Anfangsdruck im Testintervall von $5 \cdot 10^5$ Pa (in alten Einheiten: 5 bar) die in der nachfolgenden Abbildung 10 dargestellten Druckverläufe in einem Pulstest mit Gas.



Abbildung 10: Druck-Zeit-Funktionen für die eingesetzte Packerkonfiguration

Wie Abbildung 10 zeigt, können in hochdurchlässigen Formationen aus einem Pulstest mit den gewählten Randbedingungen (Drücke, Geometrie, Testfluid) bereits nach wenigen Minuten Permeabilitätswerte bestimmt werden. Bei einer Formationspermeabilität von 10^{-20} m^2 übersteigt die Druckänderung im Intervall nach einem Tag die Auflösung der Druckaufnehmer um mehr als das Zehnfache, so daß nach einem Tag ein sicheres Ergebnis ausgewiesen werden kann.

3.2 Versuchsausrüstung

Für beide Testarten muß der zu testende Bohrlochbereich druckdicht abgesperrt werden. Dazu werden Packer benutzt. Die zu messenden Größen sind der Druck im Testintervall sowie die Injektionsrate. Da als Testfluid überwiegend Gas verwendet wurde, dessen Volumen stark temperaturabhängig ist, wurde außerdem eine Temperaturmessung im Intervall durchgeführt. Die Messungen in den Auflockerungszonen um Einzelhohlräume wurden mit mechanisch setzbaren Einzelpackersystemen durchgeführt. Alle übrigen Tests wurden mit hydraulisch setzbaren Doppelpackersystemen durchgeführt. Die Packersysteme (im Folgenden Packer genannt) beinhalten die elastischen Dichtelemente zur Absperrung des Testintervalls sowie alle zur Messung und Speicherung der Meßgrößen erforderlichen Komponenten.

Art und Ausführung der verwendeten Komponenten sind abhängig von den Drücken, die in den Tests auftreten.

Generell sollten die Tests mit kleinen Fluiddrücken durchgeführt werden, da eine Änderung der Spannungsbedingungen eine Änderung der Permeabilität bewirken kann. Andererseits müssen die Fluiddrücke groß genug sein, um die dadurch bewirkten Massenströme zwischen Störeffekten wie Packerleckagen deutlich hervortreten zu lassen. Als Orientierung kann der Setzdruck der Packer dienen, der aufgrund der Steifigkeit der Gummimanschette einige 10^5 Pa betragen muß, um einen guten Anschluß der Manschette an das Gebirge zu bewirken, und der außerdem einige 10^5 Pa über dem Intervalldruck liegen muß. Ein gutes Verhältnis zwischen Stör- und Nutzsignalen kann bei Intervalldrücken in der gleichen Größenordnung erwartet werden. Unter zusätzlicher Berücksichtigung des Meßbereichs von für diese Größenordnung handelsüblichen Druckaufnehmern wurden die Sensoren der Testausrüstungen auf einen maximalen Intervalldruck von $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ausgelegt.

3.2.1 Doppelpacker

Die verwendeten Doppelpacker sperren ein Testintervall von 1,5 m Länge ab und ermöglichen Druck- und Temperaturmessungen sowohl im Testintervall als auch im Bohrlochtiefsten. Die Komponenten eines Doppelpackers sind in Abbildung 11 schematisch dargestellt.

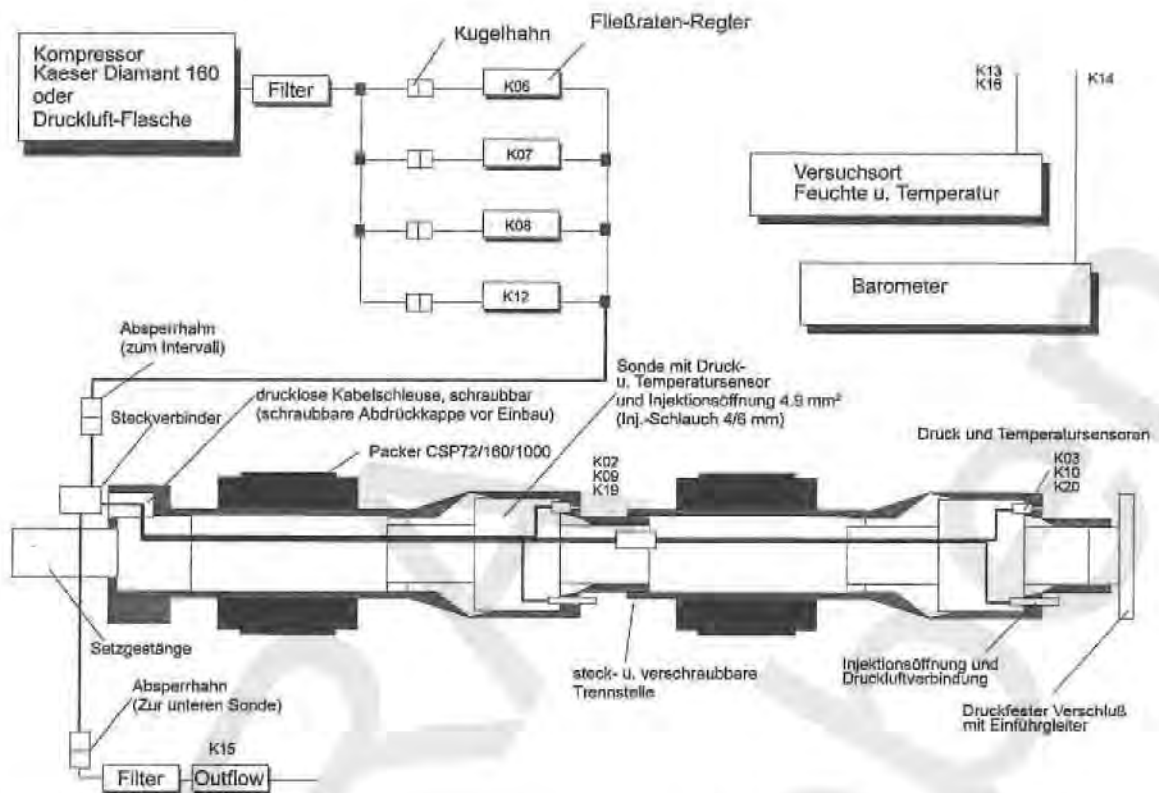


Abbildung 11: Aufbau eines Doppelpackers (die Angaben K1 etc. bezeichnen die Kanalnummer für die Speicherung des jeweiligen Parameters)

Zur Absperrung der Testintervalle werden von COMDRILL hergestellte Packer des Typs CSP 72/160/1000 verwendet. Diese Packer besitzen ein Dichtelement mit 72 mm Außendurchmesser und 1000 mm Länge. Das Dichtelement ist ein Gummischlauch mit 8 mm Wandstärke, in den ein Stahlgewebe eingelegt ist. Die Packer werden gesetzt, indem Preßluft in den Gummischlauch geleitet wird und dieser dadurch an die Bohrlochwand angedrückt wird. Packer und Intervall werden über TECALAN-Polyamidrohre (6x1 mm) beschickt, die mittels STÄUBLI-Schnellkupplungen verbunden werden.

Zur Messung der Intervall- und Packerdrücke werden Piezo-Druckaufnehmer von KISTLER des Typs 4043A verwendet. Diese Druckaufnehmer zeichnen sich neben einer hohen Auflösung durch eine für die Messung direkt im Testintervall erforderliche geringe Baugröße aus. Die verwendeten Piezo-Drucksensoren besitzen eine Auflösung von 0,1% des Meßbereichs. Der Druckmeßbereich wird in den Versuchen vollständig ausgenutzt. In den Constant Rate Tests werden die Fließraten von MKS-Flowmetern gemessen. Flowmeter der gleichen Baureihe für größere Volumenströme erfassen die Fließraten beim Druckaufbau in den Pulstests. Die Genauigkeit der Flowcontroller beträgt 0,5% des Meßbereichs. Um eine gute Ausnutzung des Meßbereichs zu ermöglichen, werden an jedem Meßplatz vier entsprechend abgestufte Flowcontroller vorgehalten.

Die gemessenen Drücke und Raten werden zusammen mit der über Pt100-Sensoren erfaßten Temperatur auf dem Massenspeicher eines transportablen PC abgelegt.

3.2.2 Testausrüstung für Kurzbohrungen

Die Tests zur Charakterisierung der Auflockerungszone um Einzelhohlräume wurden mit mechanischen Einzelpackern durchgeführt. Beim Einzelpacker wird der Vorteil des gegenüber dem Doppelpacker einfacheren Aufbaus durch den Nachteil erkauft, nicht in beliebigen Intervallen sondern nur im Bohrloch tiefsten testen zu können. Permeabilitätsmessungen in unterschiedlichen Abständen zum Stoß erfordern deshalb bei Verwendung von Einzelpackern Bohrungen unterschiedlicher Teufe.

Der Einzelpacker wird im Bohrloch gesetzt, indem sein Gummi-Dichtelement längs der Bohrlochachse mechanisch zusammengedrückt und infolge der Querdehnung an die Bohrlochwand angeedrückt wird. Im Gegensatz zu den Doppelpackern, die durch Einpressen eines Fluids gesetzt werden, kann beim mechanischen Einzelpacker folglich der Druckverlauf im Testintervall nicht durch Leckage-Gas aus dem Packer beeinflusst werden.

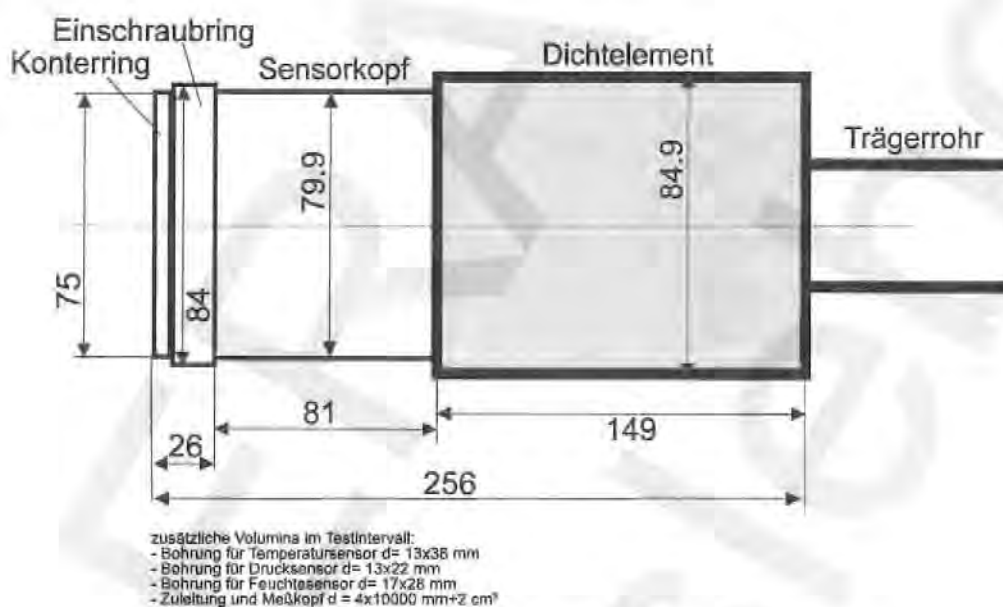


Abbildung 12: Aufbau der Testausrüstung für Kurzbohrungen

Das Packersystem hat mit Setzgestänge eine Gesamtlänge von 2,41 m. Die Länge des unmittelbar über der Sonde sitzenden Dichtelements beträgt im entspannten Zustand 149 mm. Die Meßwertaufnehmer sind im Sensorkopf unterhalb des Dichtelements eingebaut. Die Druckmessung erfolgt mittels Absolutdruckaufnehmer des Typs KISTLER 4043A. Zur Temperaturmessung wird ein Pt100-Sensor verwendet. Die Fluidinjektion in das Intervall erfolgt über ein 2,5 m langes TECALAN-Polyamidrohr (6x1 mm), das mittels STÄUBLI Schnellkupplung angeschlossen wird. Zur Dichtigkeitsprüfung kann die Injektionsöffnung mit einem Stopfen verschlossen werden. In Laborversuchen wurde ermittelt, daß das Packersystem keine meßbare Undichtigkeit und Umläufigkeit aufweist.

3.3 Testdurchführung

Bevor an einer Lokation Tests mit einem Doppelpacker durchgeführt wurden, wurde das für den Transport zur Lokation zerlegte Packersystem zusammengesteckt und seine Funktionsfähigkeit überprüft. Dazu wurde das zusammengesteckte Packersystem in einem Stahlrohr mit 86 mm Innendurchmesser mit 1,9 - 2 MPa Packerdruck gesetzt und bei geschlossener Zuleitung die Entwicklung des Packerdrucks verfolgt. Der Druckverlust des Packers mußte unter 10^3 Pa/h

liegen. Bei gesetztem Packer wurde dann das Testintervall mit 0,5 MPa beaufschlagt. Ein druckdicht zusammengesteckter Packer mußte einen Druckverlust $< 5 \cdot 10^2$ Pa/h aufweisen.

In den Bohrungen wurde zunächst ein Test über die gesamte Bohrlochlänge durchgeführt. Dazu wurde der Doppelpacker am Bohrlochmund gesetzt und das Bohrloch tiefste zwischen dem unteren Packer und der Endteufe als Testabschnitt mit Druck beaufschlagt. Nur wenn dieser Test über die gesamte Bohrlochlänge darauf hindeutete, daß in einzelnen kürzeren Intervallen Permeabilitäten größer als 10^{-20} m² angetroffen werden könnten, wurden auch Testintervalle mit 1,5 m Länge vorgesehen.

Um eine einheitliche Versuchsdurchführung zu gewährleisten, wurden für die unterschiedlichen Testarten Versuchsprotokolle entwickelt, die während der Tests als Checkliste abgearbeitet wurden. Der einzelne Bohrlöchtest begann mit dem Setzen des Packers in der vorgesehenen Teufe. Aus vorangegangenen Testserien war bekannt, daß die Qualität des Packersitzes durch Wiederholen des Setzvorgangs verbessert werden kann. Deshalb wurde der Packer mit 2 MPa beaufschlagt, entspannt und dann nochmals mit 2 MPa gesetzt.

Anschließend wurde der Druckpuls erzeugt. Dazu wurde das Testintervall bzw. bei Tests über die gesamte Bohrlochlänge das Bohrloch tiefste mit Luft bis zu einem Druck von $5 \cdot 10^5$ Pa befüllt. Die Luftrate war während der Befüllung konstant und betrug in Intervalltests 3.000 cm_{sc}³/min (Index sc: Standard Conditions) und in Tests im Bohrloch tiefsten 10.000 cm_{sc}³/min. Nachdem der Druck in der Testzone einen Wert von $p > 4,9 \cdot 10^5$ Pa erreicht hatte, wurde der Absperrhahn zum Intervall geschlossen.

Am Beginn der Schließphase wurden zusätzlich zur automatischen Meßwertspeicherung einige Druckwerte handschriftlich protokolliert. Aus diesen Werten wurde bei Pulstests im Intervall die Permeabilität mit dem Diagramm in Abbildung 13 grob abgeschätzt.

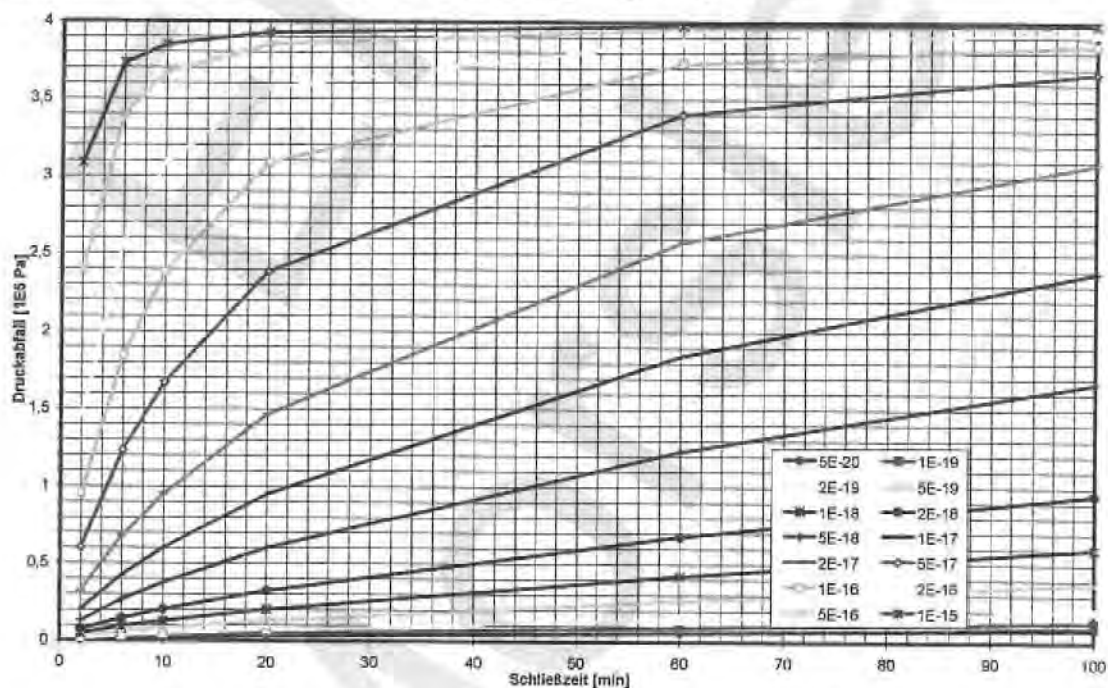


Abbildung 13: Diagramm zur Permeabilitätsabschätzung

Wenn die Abschätzung eine Permeabilität $> 10^{-17}$ m² ergab, wurde der Pulstest beendet und ein Constant Rate Test durchgeführt. Bei Permeabilitäten $< 10^{-17}$ m² wurde die Samplingrate auf wenige Meßwerte pro Stunde reduziert und der weitere Druckverlauf über 24 oder mehr Stunden aufgezeichnet. Tests im Bohrloch tiefsten wurden ausschließlich als Pulstest ausgeführt.

In Constant Rate Tests wurde die Injektionsphase über mehrere Stunden bis Tage ausgedehnt. Dabei wurde die Injektionsrate so an die vorliegenden Permeabilitätsverhältnisse angepaßt, daß der Druck im Testabschnitt während der Injektionsphase nicht über $5 \cdot 10^5$ Pa anstieg.

3.4 Testauswertung

Für alle Testauswertungen wurde die Annahme zugrunde gelegt, daß sich ein homogenes, radialsymmetrisches Fließfeld über die gesamte Länge des Testintervalls ausbildet. Der Druckverlauf in einigen Tests deutet darauf hin, daß der Fluß nicht gleichmäßig über die gesamte Länge des Testintervalls bzw. nicht radialsymmetrisch erfolgt. Dennoch wird auch für diese Tests derjenige Permeabilitätswert als Testergebnis angegeben, der sich bei Ausbildung eines radialsymmetrischen Fließfeldes über die gesamte Länge des Testabschnitts ergibt, da für die Zielsetzung der Untersuchungen nicht die feinaufgelöste Beschreibung diskreter Klüfte erforderlich ist, sondern die Angabe von repräsentativen Durchlässigkeiten für größere Gesteinsvolumina Mittelwerte.

Auch die Beschreibung einer bohrlochnahen Formationsschädigung (Skinneffekt) leistet keinen Beitrag zur hydraulischen Charakterisierung des Grubengebäudes, weshalb Composite-Modelle bei der Auswertung der gemessenen Druckverläufe nicht betrachtet werden.

Die Berechnung von Druckverläufen in Kurzbohrungen erfolgte ebenfalls mit den Gleichungen für radialen Fluß. Der Fluidabfluß über die Stirnfläche des Bohrlochs wurde also nicht berücksichtigt. Das wurde in den Rechnungen durch eine entsprechend vergrößerte Mantelfläche des Testabschnitts kompensiert. Daß diese Vorgehensweise auf korrekte Permeabilitätswerte führt, ist durch den Vergleich mit den Ergebnissen einiger numerischer Simulationen von Druckverläufen, in denen auch der Fluß über die Stirnfläche des Bohrlochs zugelassen wurde, belegt (s. Abschnitt 0, Tabelle 24).

3.4.1 Pulstest

Für die Auswertung eines Pulstests werden Druckverläufe für unterschiedliche Gebirgspermeabilitäten berechnet und mit dem gemessenen Druckverlauf verglichen. Die richtige Permeabilität ist gefunden, wenn gemessener und berechneter Druckverlauf übereinstimmen.

3.4.1.1 Aufbereitung gemessener Druckverläufe

Bevor ein gemessener Druckverlauf ausgewertet wurde, mußte er von Störeinflüssen bereinigt werden. Darunter sind alle Druckänderungen im Testintervall zu verstehen, die nicht von einem Gasaustausch zwischen Testintervall und Porenraum des umgebenden Gebirges verursacht sind.

Temperaturschwankungen spielen dabei keine Rolle, da sie unter Tage nur wenig ausgeprägt sind und der Temperaturausgleich zwischen dem Gas im Testintervall und der Bohrlochwand gemessen an der Versuchsdauer schnell vonstatten geht.

Berücksichtigt werden müssen aber alle unplanmäßigen Gasflüsse. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß die verwendeten Packer gegen die Bohrlochwand sehr gut abdichten und meßbare Gasflüsse zwischen Packer und Bohrlochwand nicht auftreten. Dagegen sind die Auswirkungen des aus den Packern austretenden Leckgases bei Pulstests in dichtem Gebirge deutlich meßbar. Zur Quantifizierung dieser Leckraten wurden Tests im Prüfrohr durchgeführt. Zusätzlich zu den Prüfrohrtests können die Tests in dichten Gebirgsbereichen der Quantifizierung von Leckraten dienen. Es wurde festgestellt, daß das aus den Packern entweichende Gas überwiegend am Bohrlochmund austritt. Nur ein kleiner Anteil gelangt in das Intervall und noch weniger in das Bohrlochtiefe.

In Abbildung 14 ist der Verlauf des Packerdruckes in einem Test im Prüfröhr mit Doppelpacker 1 dargestellt.

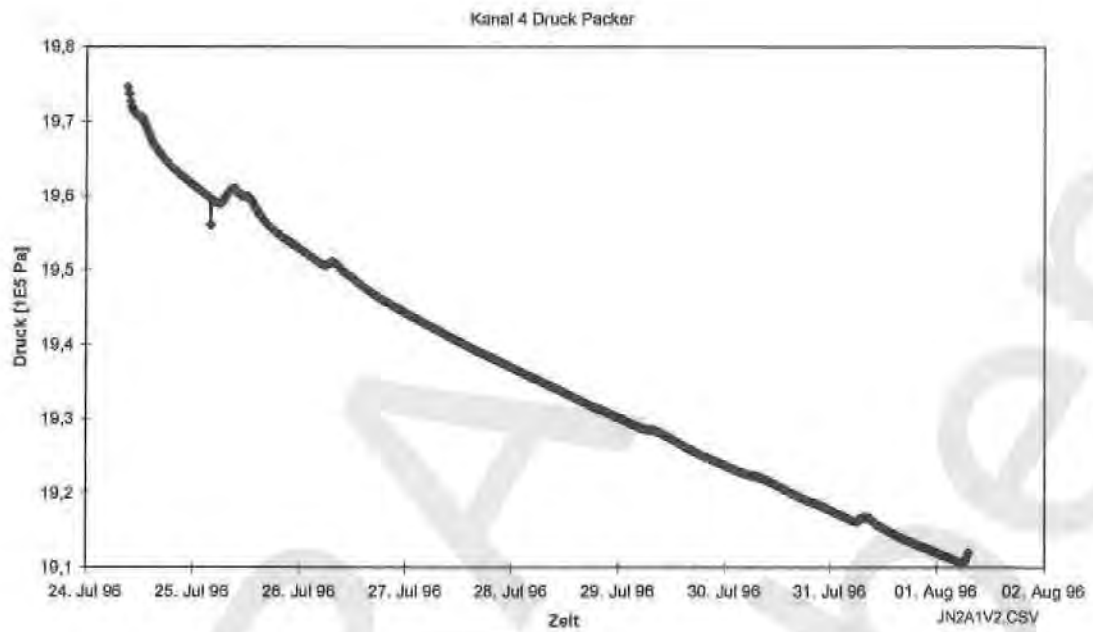


Abbildung 14: Verlauf des Packerdruckes in einem Test im Prüfröhr

Aus dem Druckverlauf kann über das Gasvolumen in den Packern der Gasvolumenstrom berechnet werden. Die für die Auswertung der gemessenen Druckverläufe maßgeblichen Volumina sind in der folgenden Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Packervolumina

	Doppelpacker 1	Doppelpacker 2
Intervallvolumen	2832 cm ³	2972 cm ³
Packervolumen	6435 cm ³	6455 cm ³
Volumen der Injektionsleitung bei beiden Doppelpackern: 630 cm ³		

Packerleckraten, die in unterschiedlichen Versuchen bei verschiedenen Versuchsdauern bestimmt wurden, sind in Abbildung 15 zusammengestellt.

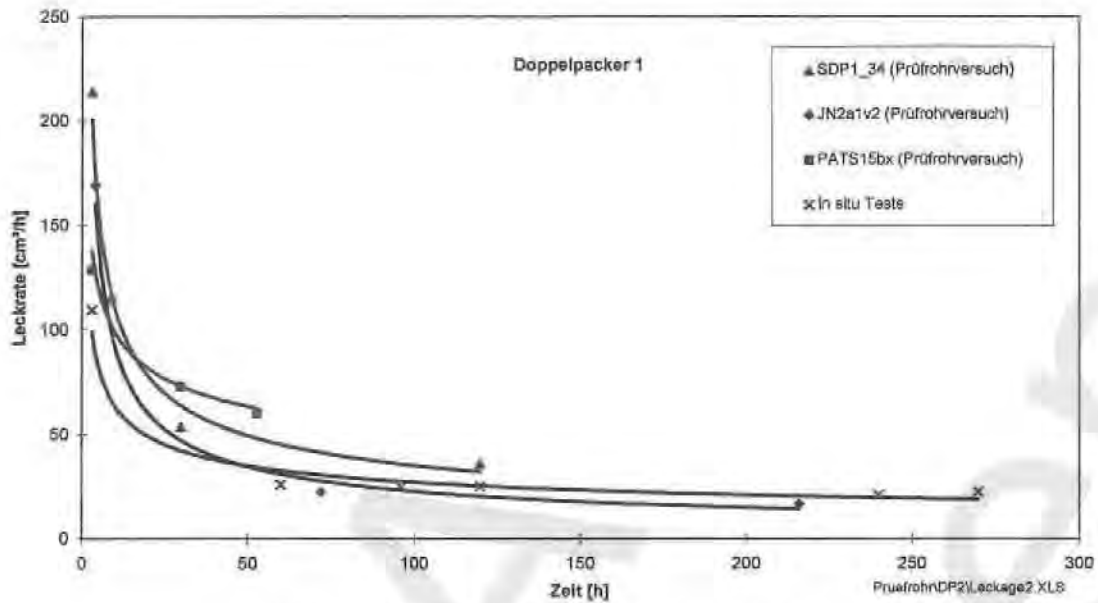


Abbildung 15: Packerleckraten für Testausrüstung 1

Es zeigt sich, daß die festgestellten Packerdruckverläufe reproduzierbar sind, und daß die Leckraten in den Tests im Prüfrohr mit den in situ Leckraten übereinstimmen. Das gleiche gilt, wie Abbildung 16 zeigt, für Doppelpacker 2.

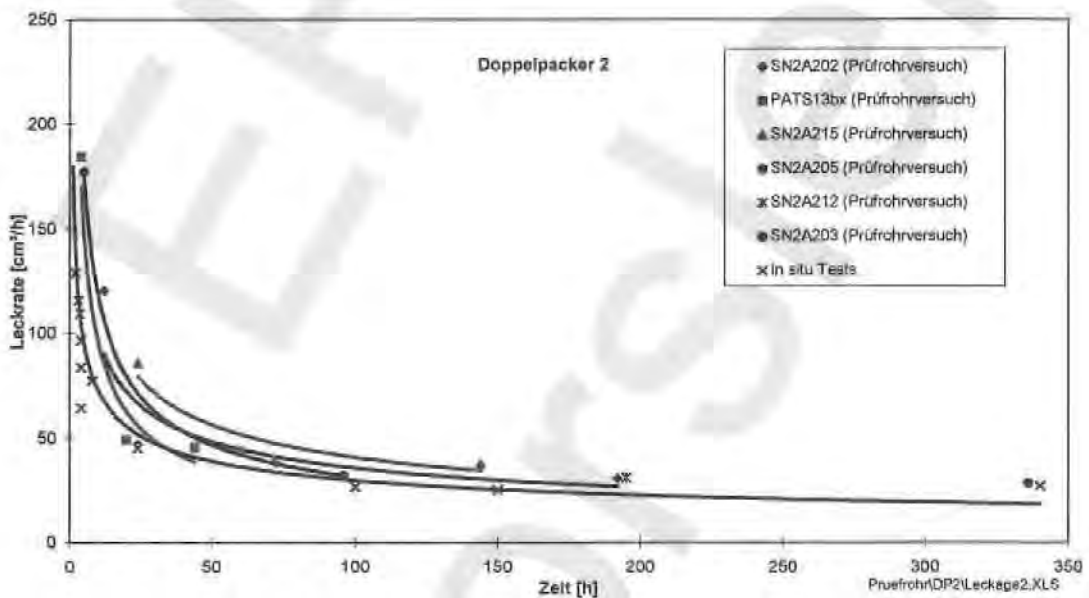


Abbildung 16: Packerleckraten für Testausrüstung 2

Für die Ermittlung der Zuflußraten aus dem Packer in das Testintervall wurden Tests im Prüfrohr herangezogen. Allerdings sind aufgrund mangelhafter Abdichtung der Packer gegen die Wandung des Aluminium-Prüfrohrs in einigen Tests im Prüfrohr und des damit verbundenen Druckabfalls im Intervall nicht alle Tests auswertbar. Die in den Versuchen mit ausreichender Dichtwirkung des Packers gemessenen Druckanstiege im Intervall sind in Fließraten umgerechnet in Abbildung 17 dargestellt. Dabei kann die dargestellte Ausgleichsfunktion für die Meßwerte aufgrund der geringen Werteanzahl nur als grober Anhalt für die zu erwartende Größenordnung der Gaszuflüsse aus dem Packer in das Intervall dienen.

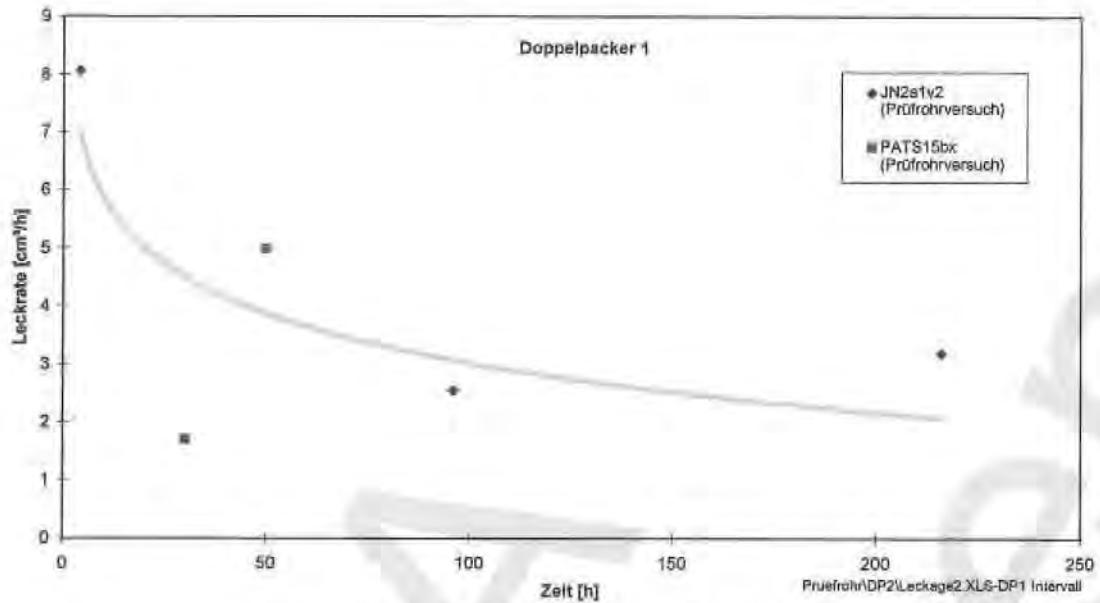


Abbildung 17: Zuflüsse aus dem Packer in das Intervall

Offensichtlich sind die Zuflüsse in das Intervall wesentlich geringer als die Gasverluste aus dem Packer. Noch kleiner sind die Volumenströme aus dem Packer in das Bohrloch tiefste, wie Abbildung 18 zeigt.

Diese Ergebnisse aus Tests im Prüfrohr werden durch Ergebnisse aus in situ Tests qualitativ bestätigt. In den meisten Tests wurde entweder das Bohrloch tiefste oder das Intervall als Kontrollzone zur Detektion von Umläufigkeiten genutzt. In diesen Tests kann ein Druckanstieg in der Kontrollzone dem Gaszufluß aus dem Packer zugeschrieben werden. Dadurch wird der Gasfluß aus dem Packer in die Kontrollzone maximal abgeschätzt, da hierin auch etwaige Gaszutritte aus der Testzone sowie Packerumläufigkeiten enthalten sind.

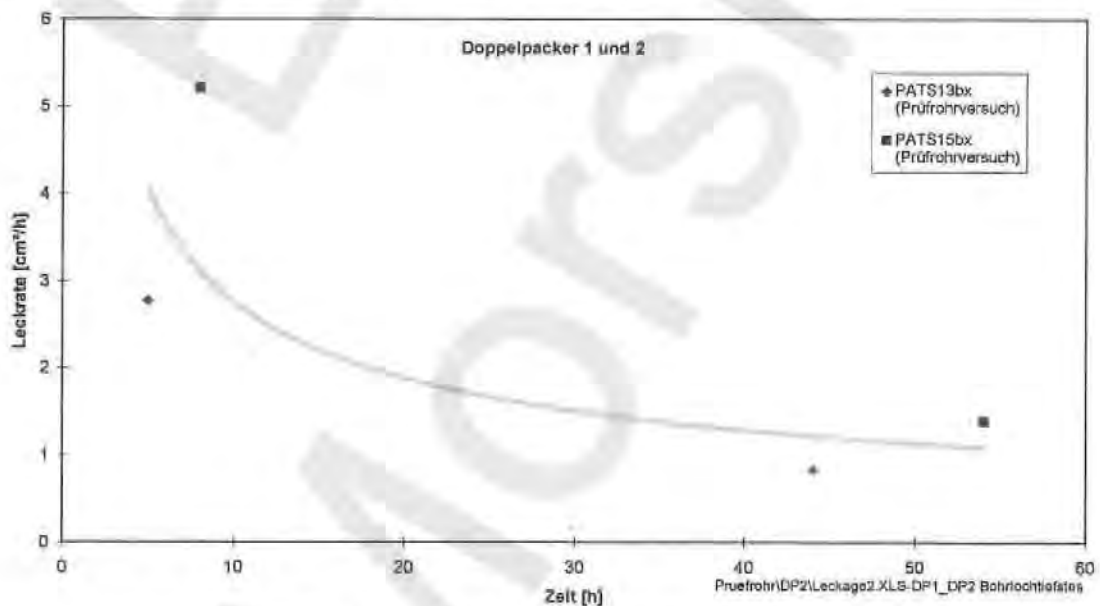


Abbildung 18: Zuflüsse aus dem Packer in das Bohrloch tiefste

Die Daten aus Tests, in denen das Intervall als Kontrollzone diente, sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die angegebenen Versuchsbezeichnungen setzen sich aus der Nummer der Boh-

rung in den Ziffern 1 bis 3, der Nummer der verwendeten Testausrüstung in Ziffer 4 und einer, auf die Bohrung bezogen, fortlaufenden Versuchsnummerierung in den beiden letzten Ziffern zusammen.

Tabelle 2: Gaszufüsse in das Intervall

Doppelpacker 1			Doppelpacker 2		
Versuch	Druckaufbau im Intervall [10^2 Pa/h]	Zufluß in das Intervall [cm^3/h]	Versuch	Druckaufbau im Intervall [10^2 Pa/h]	Zufluß in das Intervall [cm^3/h]
525103	5	17,3	526201/4	3,6	13
525106	3,215	11,1	538201	4	14,4
527105	2,42	8,4	538202	2	7,2
			538211/12	2,68	7,9
Mittelwert:		12,3	Mittelwert:		10,6

Als Anhalt für den Gasstrom aus dem Packer in das Bohrlochtiefstes können die in Tabelle 3 aufgelisteten Versuche dienen. Wegen der geringen Druckanstiege und des großen Volumens im Bohrlochtiefstes sind die sich rechnerisch ergebenden Volumenströme als Abschätzung zu verstehen.

Tabelle 3: Gaszufüsse in das Bohrlochtiefstes

Versuch	Druckanstieg im Bohrlochtiefstes [Pa]	Beobachtungszeitraum [h]	Volumen im Bohrlochtiefstes [dm^3]	Volumenstrom [cm^3/h]
527101/2	ca. 150	120	142	1,8
527103/4	ca. 100	144	142	1
538209/10	ca. 100	168	63	0,4

Die Interpretation der gemessenen Druckanstiege als ausschließlich technisch verursacht läßt die Möglichkeit eines Gaszutritts aus dem Gebirge außer Acht. Diese Sichtweise ist zumindest bei den Bohrungen RB525, 526 und 527 berechtigt, da diese Bohrungen in der Hauptmulde und somit in einem seit Jahrzehnten intensiv durchörterten Bereich liegen, in dessen Schweben- und Pfeilersystem nicht mit dem Auftreten gespannter Gase zu rechnen ist.

Aus den vorgestellten Meßergebnissen ergeben sich folgende Fließraten, die als Zustrom aus dem Packer in das Intervall bzw. in das Bohrlochtiefstes zu unterstellen sind:

- $1,8 \text{ cm}^3/\text{h}$ als Gasstrom in das Bohrlochtiefstes für beide Testausrüstungen,
- $12,3 \text{ cm}^3/\text{h}$ als Gasstrom in das Intervall für Testausrüstung 1,
- $10,6 \text{ cm}^3/\text{h}$ als Gasstrom in das Intervall für Testausrüstung 2.

Die Werte für den Gasstrom in das Bohrlochtiefstes streuen nach Tabelle 3 stark, stimmen in der Größenordnung aber mit den Ergebnissen der Prüfröhrversuche in Abbildung 18 überein. Der Einfluß der Leckrate auf das Testergebnis ist proportional zum Verhältnis der Leckrate zum Volumen des abgepackerten Testabschnitts. Dieses Volumen ist bei den Tests im Bohrlochtiefstes so groß, daß der Gasstrom aus dem Packer nicht maßgeblich für das Testergebnis ist. Die größere Streuung der Werte für den Gasstrom in das Bohrlochtiefstes ist daher unerheblich.

Die angegebenen Fließraten werden in Abhängigkeit vom abgepackerten Bohrlochvolumen in Druckänderungsraten umgerechnet. Aus der Druckänderungsrate und der jeweiligen Versuchszeit ergibt sich zu jedem gemessenen Druckwert ein Korrekturdruck, der vom Meßwert abgezogen wird. Durch diese Vorgehensweise wird verhindert, daß ein Gasstrom aus dem Bohrloch in das Gebirge durch einen Zufluß in das Bohrloch aus dem Packer (teilweise) kompensiert wird und aufgrund der dadurch geringeren gemessenen Druckabnahme im Bohrloch eine kleinere Permeabilität als tatsächlich vorhanden angenommen wird.

Bei den Tests mit Einzelpackern ist eine Beeinflussung der Messung durch Leckgas nicht zu besorgen, da diese Packer mechanisch gespannt werden.

3.4.1.2 Berechnung von Druckverläufen

Mathematische Beschreibung der Druckverläufe

Die Berechnung des Druckverlaufs in einem Pulstest geht auf COOPER et al. (1967) zurück. COOPER et al. leiten eine Differentialgleichung zur Beschreibung des Druckverlaufs in einer Formation nach einer plötzlichen Druckstörung in Abhängigkeit von der Entfernung r zur Druckstörung (radialsymmetrische Geometrie) und von der Zeit t ab. Dabei wurden die Drücke als Spiegelhöhen h angegeben und die Fluid- und Formationseigenschaften unter der Speicherkapazität S und der Transmissibilität T subsummiert:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Gl. 1}$$

- mit
- h - Spiegelhöhe
 - r - Radius um den Ort der Druckstörung
 - t - Zeit
 - S - Speicherkapazität
 - T - Transmissibilität.

Als Lösung für die Differenz H zwischen der Spiegelhöhe in einer Bohrung und der Spiegelhöhe in der Formation in Abhängigkeit von der initialen Differenz der Spiegelhöhen H_0 ergibt sich

$$H = \frac{8H_0\alpha}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\exp\left(\frac{-\beta u^2}{\alpha}\right)}{u \left[(uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u))^2 + (uY_0(u) - 2\alpha Y_1(u))^2 \right]} du \quad \text{Gl. 2}$$

mit $\beta = \frac{Tt}{r_c^2}$ und $\alpha = \frac{r_s^2}{r_c^2} S$

- mit
- H - Spiegelhöhendifferenz Bohrloch/Formation
 - H_0 - initiale Spiegelhöhendifferenz Bohrloch/Formation
 - r_s - Bohrllochdurchmesser in der Formation
 - r_c - Casingdurchmesser
 - J_0 - Besselsche Funktion erster Gattung Ordnung Null
 - J_1 - Besselsche Funktion erster Gattung erster Ordnung
 - Y_0 - Webersche Funktion Ordnung Null
 - Y_1 - Webersche Funktion erster Ordnung.

BREDEHOEFT & PAPADOPULOS (1980) zeigten, daß diese für ein offenes Bohrloch angegebene Lösung auch für ein geschlossenes Bohrloch gilt und daher den Druckverlauf in einem Pulstest beschreibt, wenn

$$\beta = \frac{Tt\pi}{Vc\rho g} \quad \text{und} \quad \alpha = \frac{\pi r_s^2 S}{Vc\rho g}$$

gesetzt wird. Darin ist V das eingeschlossene Bohrlochvolumen, c die Kompressibilität von Fluid und Formation, ρ die Dichte des Fluids und g die Erdbeschleunigung.

Werden anstelle der Spiegelhöhen in Gl. 1 Drücke angegeben und die Speicherkapazität S durch den Ausdruck $\phi c h$ sowie die Transmissibilität T durch kh / μ ersetzt, nimmt die Diffusivitätsgleichung die Form

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi c_i \mu}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{Gl. 3}$$

an. Analog zur Lösung der Gl. 1 kann der Druck als Funktion des Ortes r und Zeit t mit Gl. 2 berechnet werden, wenn statt der relativen Spiegelhöhendifferenz H/H_0 der dimensionslose Druck p_D verwendet wird. Außerdem wird gesetzt:

$$\beta = \frac{kht\pi}{V_w c_i \mu} \quad \text{und} \quad \alpha = \frac{\pi r_w^2 \phi c_i h}{V_w c_i} \quad \text{Gl. 4}$$

- mit
- c_i - Kompressibilität
 - h - Länge des Testintervalls
 - r_w - Bohrlochradius
 - V_w - Fluidvolumen im Testintervall
 - k - Permeabilität
 - ϕ - Porosität
 - μ - Viskosität.

Der dimensionslose Druck p_D kann mit der Beziehung

$$p_D = \frac{p_i - p_w}{p_i - p_0} \quad \text{Gl. 5}$$

- mit
- p_D - dimensionsloser Druck
 - p_i - initialer Porendruck im Gebirge
 - p_0 - Anfangsdruck im Bohrloch
 - p_w - Druck im Bohrloch am betrachteten Zeitpunkt

in den Druck im Bohrloch umgerechnet werden.

Die für geringkompressible Flüssigkeiten abgeleitete Diffusivitätsgleichung kann auch auf Gase angewendet werden, wenn anstelle der Drücke Pseudodrücke $m(p)$ verwendet werden (AL-HUSSAINY & RAMEY, 1966):

$$m(p) = 2 \int \frac{p}{\mu_g z} dp \quad \text{Gl. 6}$$

- mit
- z - Realgasfaktor.

Wegen der Abhängigkeit des Realgasfaktors und der Gasviskosität vom Druck ist die Gl. 3 nichtlinear. Sie kann linearisiert werden, indem für den Realgasfaktor und die Viskosität die

mittleren Werte innerhalb des im Test durchlaufenen Druckbereichs als Konstanten eingesetzt werden.

Praktische Umsetzung der Berechnung

Da die Kompressibilität des Gesteins im Vergleich zu der des Gases klein ist, wurde sie vernachlässigt und die Gesamtkompressibilität gleich der Gaskompressibilität gesetzt. Als Gaskompressibilität wurde der reziproke Initialdruck im Bohrloch eingesetzt. Der dadurch verursachte Fehler kann vernachlässigt werden, wenn in Tests in geringpermeablem Gebirge nur geringe Veränderungen des Bohrlochdruckes auftreten. Das dabei vorausgesetzte Idealgas-Verhalten war bei den in den Tests angewendeten Drücken unter 0,5 MPa näherungsweise gegeben. Mit diesen Annahmen wurden aus der Bohrlochgeometrie α und β nach Gl. 4 als Funktion von Porosität und Permeabilität berechnet.

Das Integral in Gl. 2 ist nicht geschlossen lösbar und mußte daher numerisch berechnet werden. Charakteristisch für den Integranden ist eine monotone Annäherung an ein Maximum im positiven Wertebereich und anschließend eine asymptotische Annäherung an den Nullwert. Beide Parameter α und β in Gl. 2 beeinflussen den Verlauf des Integranden. Zur Vorgabe der oberen Integrationsgrenze wird zunächst der Maximalwert des Integranden berechnet und dann die obere Integrationsgrenze als der Wert der Integrationsvariablen bestimmt, oberhalb dessen der Wert des Integranden unter 1/1000 seines Maximalwertes abgefallen ist. Der so festgelegte Integrationsbereich wird in 20 Integrationsintervalle aufgeteilt und nach der Simpson-Regel integriert.

Das Ergebnis ist der dimensionslose Pseudodruck $m_D(p)$ am betrachteten Zeitpunkt t . Da im angewendeten Druckbereich bis 0,5 MPa der Realgasfaktor nur wenig von 1 verschieden ist und die Druckabhängigkeit der Viskosität vernachlässigt werden kann, vereinfacht sich Gl. 6 zu

$$m(p) = \frac{p^2}{\mu_g}$$

Daher kann aus dem Ergebnis der Integration der Druck im Bohrloch entsprechend Gl. 5 über die Beziehung

$$p = \sqrt{p_i^2 - p_D(p_i^2 - p_0^2)}$$

berechnet werden. Die Durchführung dieser Berechnung für unterschiedliche Zeitpunkte t ergibt den Druckverlauf im Pulstest.

Um die Zulässigkeit der zur Berechnung der Druckverläufe getroffenen Annahmen zu überprüfen, wurden für einige Tests Vergleichsberechnungen von der COLENCO POWER CONSULTING AG mit ihrer Testauswertesoftware MULTIFIT durchgeführt. Die Ergebnisse beider Berechnungen weichen in der Anfangsphase eines Pulstests mit Gas, in der der Druck von 0,5 auf 0,4 MPa abfällt, um weniger als zwei Prozent voneinander ab. Beim weiteren Druckabfall werden die Abweichungen größer, da der Unterschied zwischen der tatsächlichen Kompressibilität und dem in der Berechnung benutzten reziproken Initialdruck mit sinkendem Bohrlochdruck größer wird.

Der Zeitraum, in dem der Druckabfall von 0,5 auf 0,4 MPa stattfindet, beträgt bei einer Gebirgspermeabilität von 10^{-19} m^2 ca. 100 Stunden, bei einer Gebirgspermeabilität von 10^{-20} m^2 ca. 1000 Stunden. Folglich ist bei Tests in geringpermeablem Gebirge und Testdauern bis zu einer Woche entsprechend 168 Stunden dieser anfängliche Druckabfall ausschlaggebend. Nach einwöchiger Testdauer würde der Bohrlochdruck bei einer Gebirgspermeabilität von $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ fast 40 % über dem bei $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ liegen. Daher und weil in den unterschiedlichen Gebirgsbereichen Permeabilitäten erwartet werden, die um mehrere Zehnerpotenzen voneinander abweichen, ist

die festgestellte Abweichung der berechneten Druckwerte um zwei Prozent als irrelevant einzustufen. Dies wird durch die nachfolgende Abbildung 19 verdeutlicht.

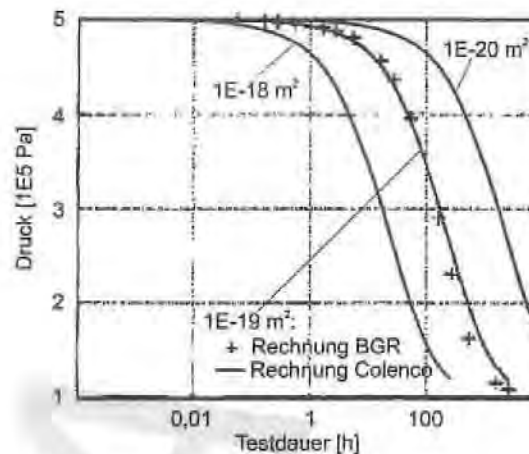


Abbildung 19: Vergleich berechneter Druckverläufe BGR/Colenco

In dieser ursprünglich von COLENCO erstellten Abbildung sind die beiden für 10^{-19} m^2 von BGR und Colenco berechneten Permeabilitäten einander gegenübergestellt. Dabei wurden die geometrischen Verhältnisse bei Einsatz des Doppelpackers 2 in einem 86 mm Bohrloch und ein initialer Gasdruck im Bohrloch von 0,5 MPa angenommen. Zusätzlich sind die Druckverläufe eingezeichnet, die sich für die genannten Bedingungen bei einer Vergrößerung bzw. Verringerung der Permeabilität um eine Größenordnung ergeben. Es zeigt sich, daß die geringen Abweichungen zwischen den von BGR und Colenco berechneten Druckverläufen keine Auswirkung auf die einem Druckverlauf zuzuordnende Permeabilität haben.

3.4.1.3 Anpassung berechneter Druckverläufe

Bei der Berechnung von Druckverläufen sind Porosität und Permeabilität freie Parameter. Die geometrischen Daten sind durch die Abmessungen der Testausrüstung und des Bohrlochs vorgegeben. Als Anfangsdruck im Bohrloch ist der initiale Bohrlochdruck im Test anzusetzen und der initiale Porendruck im Gebirge wird auf 0,1 MPa (Atmosphärendruck) gesetzt. Dieser initiale Porendruck muß für Wegsamkeiten in aufgelockerten Gebirgsbereichen mit hydraulischer Verbindung zu den Grubenbauen aufgrund der mehrere Jahrzehnte langen Standzeit der Grubenbaue angenommen werden.

Zur Anpassung der berechneten Druckverläufe an die Meßkurven können sowohl die Permeabilität als auch die Porosität so verändert werden, daß eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung erreicht wird. Dabei sind die Resultate nur in relativ engen Grenzen mehrdeutig, da Porosität und Permeabilität den Druckverlauf unterschiedlich beeinflussen. Das wird in Abbildung 20 demonstriert. Dort sind die berechneten Druckverläufe eingezeichnet, die sich bei Variation der Porosität und der Permeabilität um jeweils zwei Zehnerpotenzen ergeben. Die geometrischen Daten wurden entsprechend den Testbedingungen gewählt.

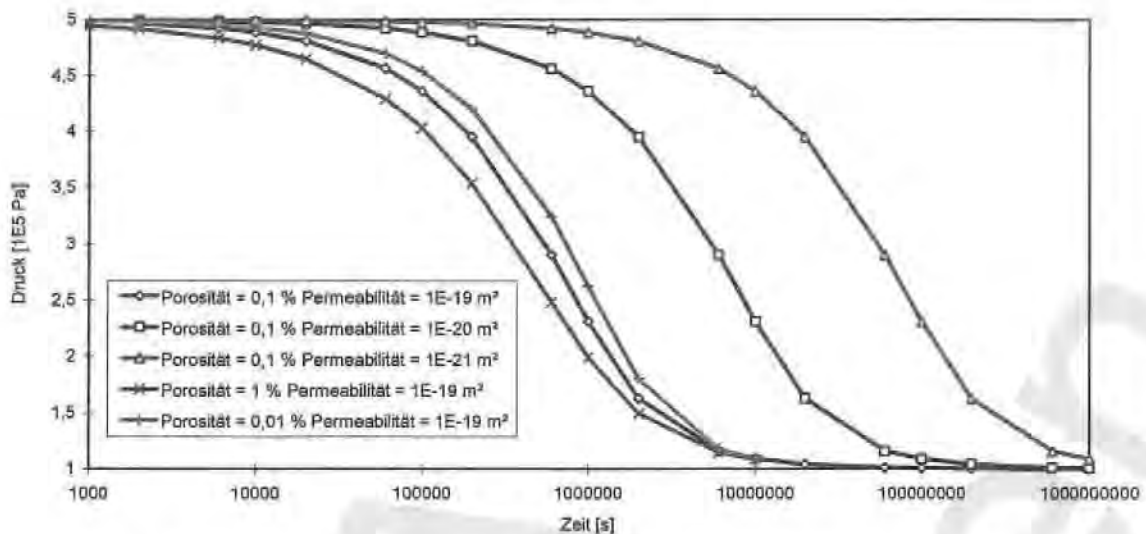


Abbildung 20: Einfluß von Porosität und Permeabilität auf den Druckverlauf in einem Pulstest

Die Grafik zeigt, daß die Porosität die Form der Druckkurve beeinflusst und höhere Porositäten auf flachere Druckkurven führen. Eine Veränderung der Permeabilität bedeutet eine Verschiebung der Kurve bezüglich der Zeitachse ohne Änderung der Kurvenform. Insgesamt ist der Druck wesentlich stärker von der Permeabilität als von der Porosität abhängig. Selbst die Annahme einer Porosität, die von der tatsächlichen Porosität des Gebirges um zwei Größenordnungen entfernt ist, ändert die sich ergebende Permeabilität nur graduell und nicht in der Größenordnung. Das angewandte Verfahren der Anpassung einer errechneten Kurve an eine gemessene ist daher besser zur Permeabilitätsbestimmung als zur Bestimmung der Porosität geeignet. Aus diesem Grund wurde auf die gleichzeitige Optimierung beider Parameter in den Auswertungen verzichtet und statt dessen die Porosität grundsätzlich auf den Wert 0,5 % gesetzt. Porositäten in dieser Größenordnung wurden an Kernproben aus den getesteten Bohrungen in Labormessungen ermittelt.

3.4.2 Constant Rate Test

Die in Abschnitt 3.4.1.1 beschriebene Korrektur der in Pulstests gemessenen Druckverläufe braucht auf Druckverläufe aus Constant Rate Tests nicht angewandt werden, da in hochdurchlässigen Gebirgsbereichen die Fließraten im Gebirge im Vergleich zu den Packerlekraten groß sind. Das Ergebnis eines Constant Rate Tests ist daher unabhängig davon, ob eine Berücksichtigung der Leckraten erfolgt.

Der Druckverlauf bei konstanter Fließrate wird durch die Gleichung für transienten Fluß beschrieben, solange sich die Formation wie ein unendliches Reservoir verhält, die Druckfront also noch keine Begrenzung der Formation erreicht hat:

$$p_{wf}(t)^2 = p_i^2 + \frac{q_{f,sc} \mu p_{sc}}{2\pi h k} \left(\ln \frac{kt}{\phi \mu c_g r_w^2} + 0,809 \right)$$

- mit
- $p_{wf}(t)$ - Intervalldruck zum Zeitpunkt t
 - p_i - initialer Intervalldruck
 - $q_{f,sc}$ - Abfluß in die Formation
 - μ - Viskosität des Gases
 - c_g - Kompressibilität des Gases

- h - abgepackerte Mächtigkeit
- r_w - Bohrlochradius
- ϕ - Porosität
- k - Permeabilität
- t - Injektionsdauer

Index sc: Standardbedingungen.

Folglich ist die Steigung des zeitlichen Verlaufs der Quadrate des Druckes im halblogarithmischen Netz der Permeabilität proportional.

Die angegebene Gleichung beschreibt den Druckverlauf im Testintervall, nachdem die Phase der Bohrlochspeicherung beendet ist (s. Abschnitt 3.1.2). Das Ende der Phase der Bohrlochspeicherung läßt sich in einer doppeltlogarithmischen Darstellung am Ende der negativen Steigung des Derivative-Verlaufs erkennen (Erläuterungen z.B. in HORNE (1990)). Wie die Abbildung 21 zeigt, ist das nach deutlich weniger als 1000 s Injektionsdauer der Fall, so daß die späte Injektionsphase zur Ermittlung der Permeabilität geeignet ist.

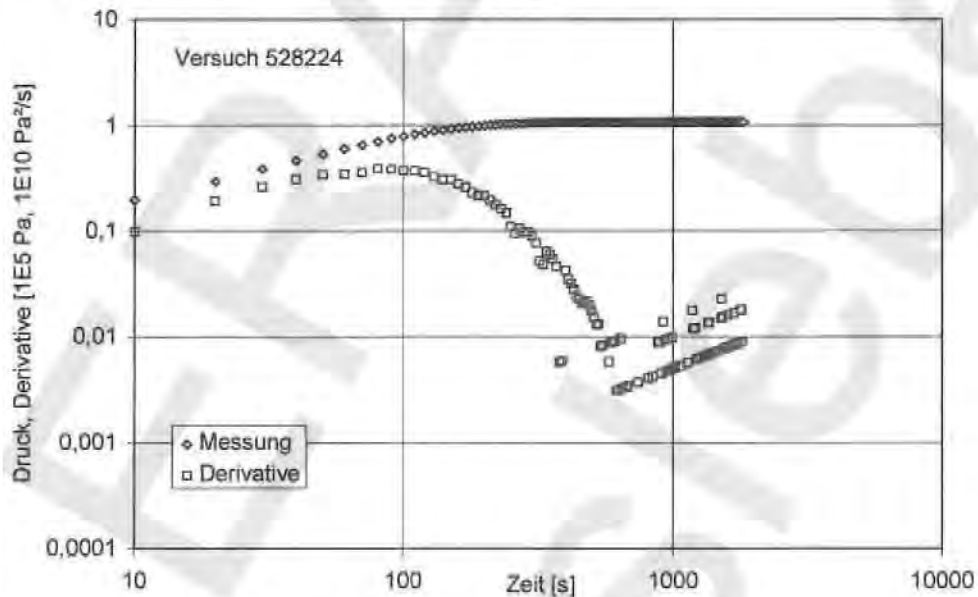


Abbildung 21: Diagnoseplot des Tests 528224

In Abbildung 22 ist der zeitliche Verlauf der Quadrate des Druckes aus Test 528224 im halb-logarithmischen Netz dargestellt. Die Steigung der Druckkurve nach dem Ende der Wellbore Storage Phase wird mit der angegebenen Gleichung in die Gebirgspermeabilität umgerechnet. Sie beträgt hier 10^{-13} m^2 .

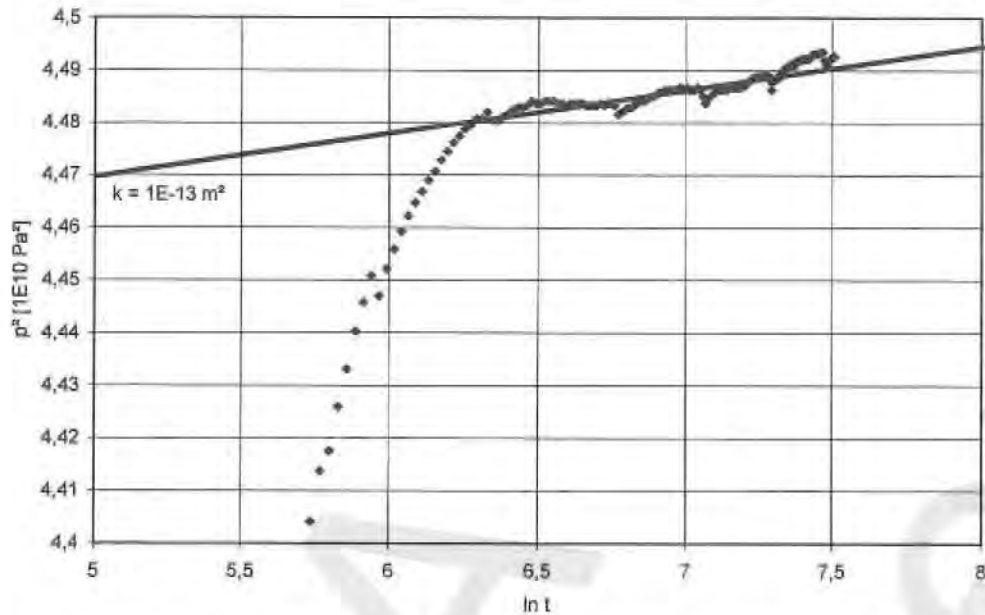


Abbildung 22: Steigung des zeitlichen Verlaufs der Quadrate des Druckes im Test 528224

4 Ergebnisse

4.1 Testergebnisse

4.1.1 Intervalltests mit Doppelpackern

Bevor die Ergebnisse der einzelnen Tests nach Bohrungen geordnet präsentiert werden, wird zur Veranschaulichung der Vorgehensweise bei der Durchführung und Auswertung der Messungen ein Test in der Bohrung RB 527 sehr detailliert vorgestellt.

Wie im Versuchsprotokoll festgelegt, beginnt der Versuch mit dem zweimaligen Setzen des Packers. Im aufgezeichneten Packerdruck in Abbildung 23 sind die beiden Setzvorgänge zu erkennen.

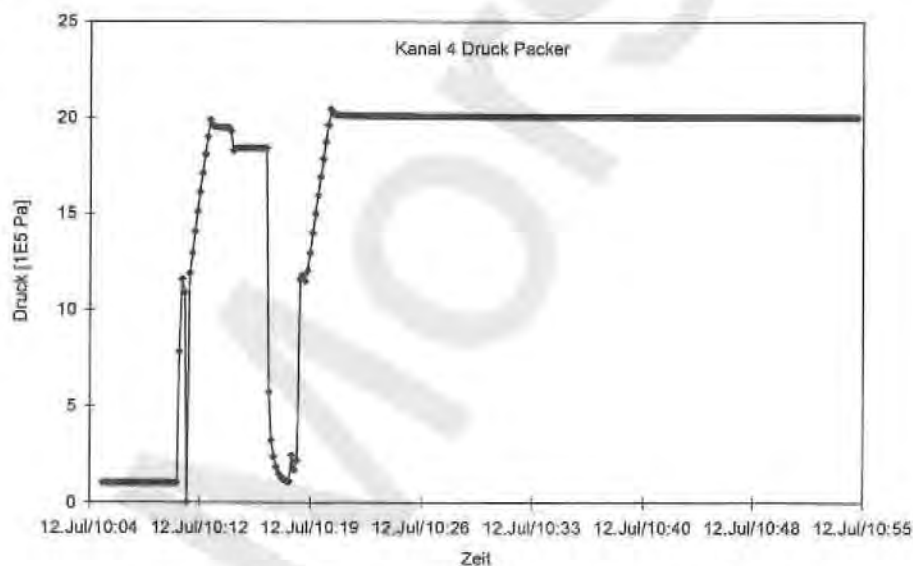


Abbildung 23: Test 527101/2, zweimaliges Setzen des Packers

Es folgt die Befüllung des Testintervalls mit der Rate 3.000 cm_s^3 . Bei dem in diesem Test verwendeten Doppelpacker 1 muß ein Volumen von 3.602 cm^3 (Intervall und Zuleitung, s. Tabelle 1) befüllt werden. Um in diesem Volumen den Gasdruck von $1 \cdot 10^5$ auf $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ zu erhöhen, müssen $4 \cdot 3.602 \text{ cm}^3$ injiziert werden. Bei der eingestellten Fließrate von 3.000 cm_s^3 dauert das 4,8 Minuten. Die aufgezeichnete Gasrate ist in Abbildung 24 dargestellt.

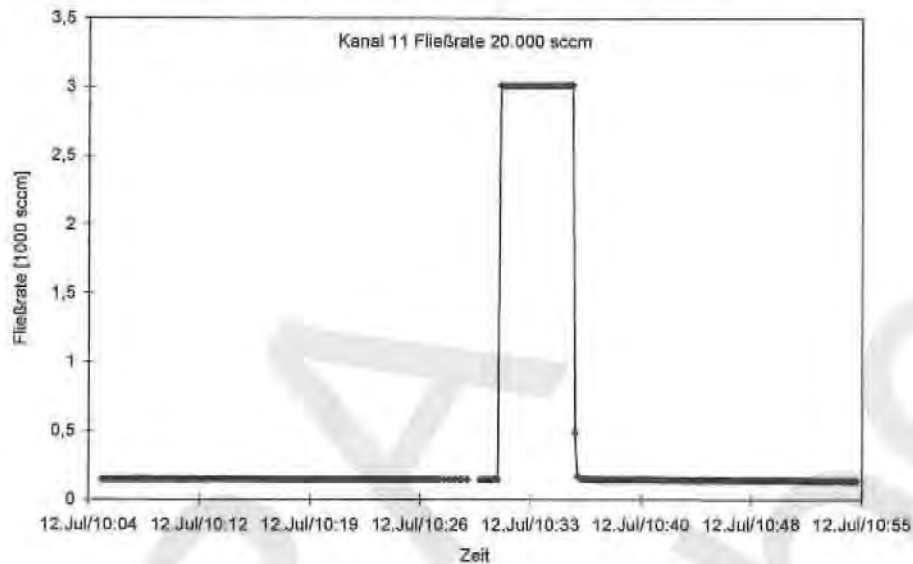


Abbildung 24: Test 527101/2, Gasinjektion in das Testintervall

Durch die Injektion in das Testintervall mit konstanter Rate steigt der Druck dort linear an. Der im Intervall gemessene Druck ist in Abbildung 25 dargestellt.

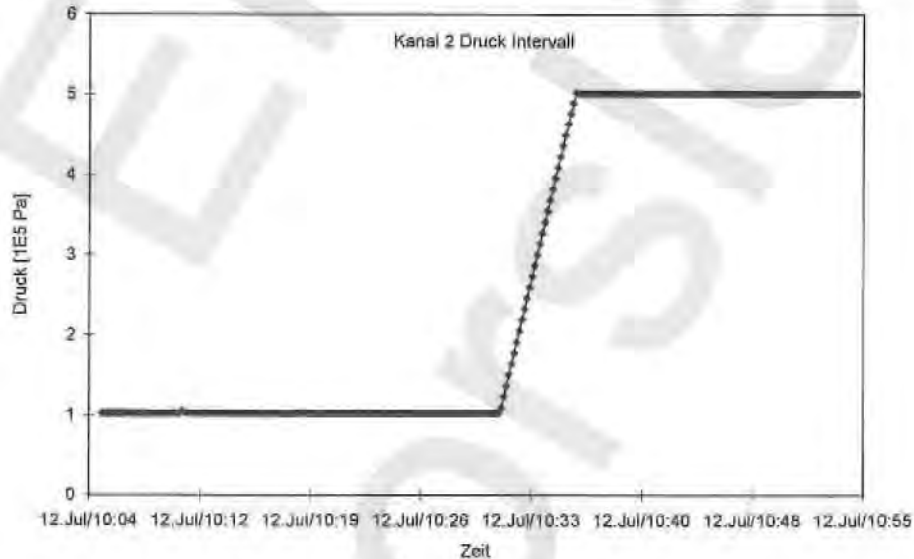


Abbildung 25: Test 527101/2, Druckanstieg im Testintervall

Der Befüllungsvorgang zeichnet sich auch im Verlauf der Temperatur ab, die im Testintervall gemessen wurde. Wie Abbildung 26 zeigt, hat die Temperatur im Intervall generell eine abnehmende Tendenz. Dieser Trend wird durch die Injektion des im Kompressor erwärmten Gases durchbrochen, setzt sich aber nach der Injektion weiter fort.

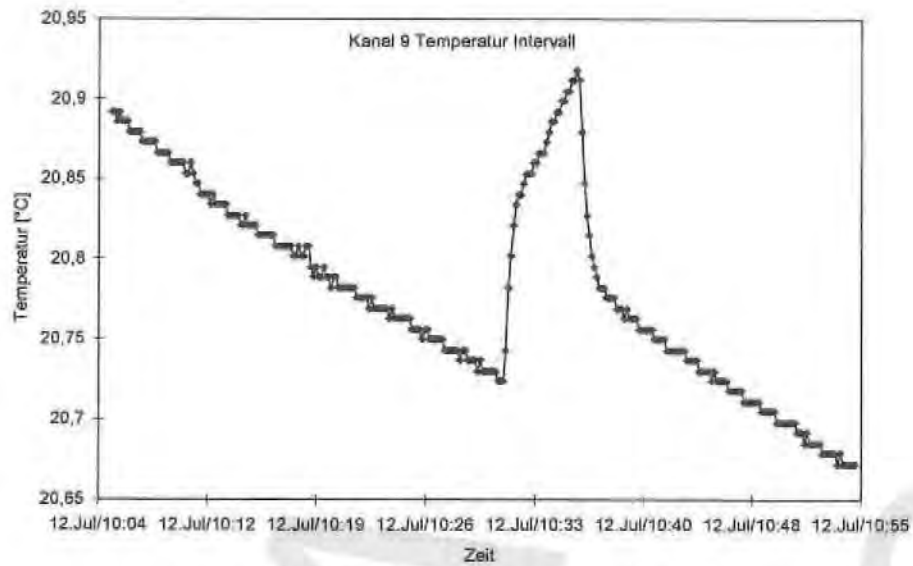


Abbildung 26: Test 527101/2, Temperaturverlauf im Testintervall

Der weitere Verlauf der Temperatur während der nachfolgenden fünftägigen Messung zeigt, daß die Temperaturänderungen für die Druckinterpretation belanglos sind: Die Temperatur der Testausrüstung sinkt schnell auf die Gebirgstemperatur und bleibt dann auf diesem Niveau konstant.

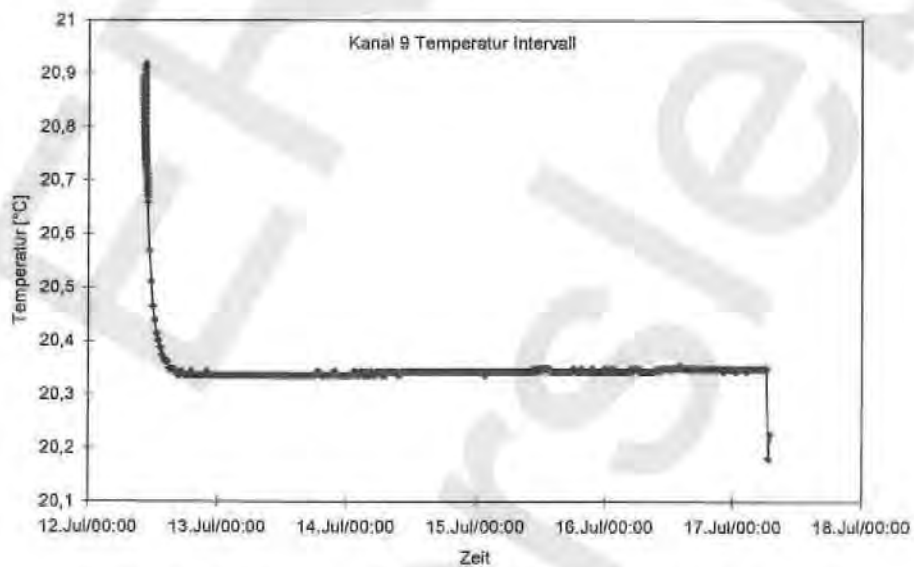


Abbildung 27: Test 527101/2, langfristiger Temperaturverlauf im Testintervall

Abbildung 28 zeigt die Druckentwicklung im Testintervall. Insgesamt verändert sich der Druck während der fünftägigen Messung nur sehr wenig, die maximale Änderung beträgt ca. 10^3 Pa, entsprechend 0,2 % des Anfangswertes.

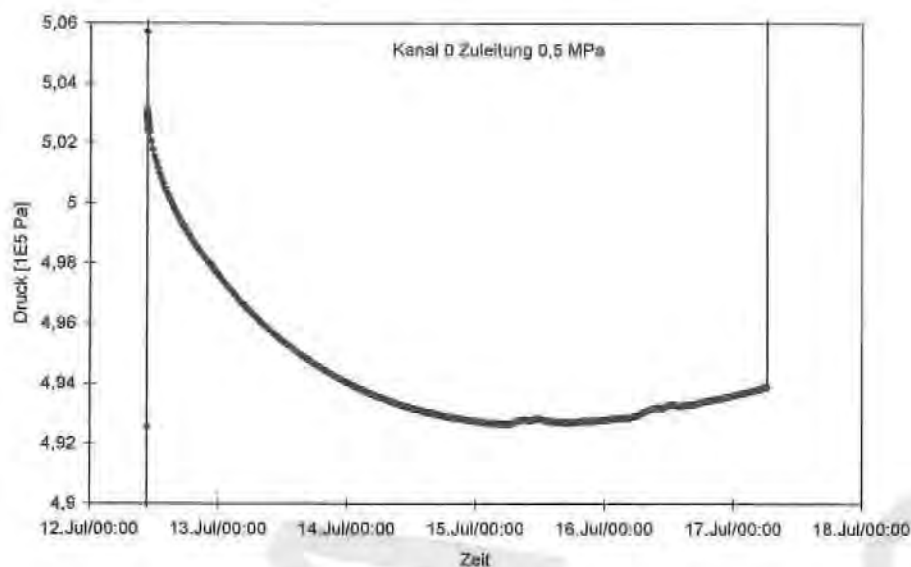


Abbildung 28 Test 527101/2, Druckverlauf im Testintervall

Auffallend am Druckverlauf im Intervall ist, daß die anfängliche Druckabnahme später in eine Zunahme des Druckes übergeht. Offensichtlich kann in diesem Test der Gaszufluß aus dem Packer in das Intervall nur am Anfang durch einen Gasabfluß aus dem Intervall in das Gebirge kompensiert werden. Da bei einem Pulstest der Gasstrom aus dem Intervall in das Gebirge mit zunehmender Testdauer kleiner wird, während sich der Zustrom aus dem Packer in das Intervall später kaum ändert, kann in geringpermeablen Gebirgsbereichen diese Umkehr des Druckverlaufes beobachtet werden.

Der Druckverlauf im Packer ist in Abbildung 29 aufgetragen. Der Packerdruck zeigt das im Abschnitt 3.4.1 erläuterte Verhalten.

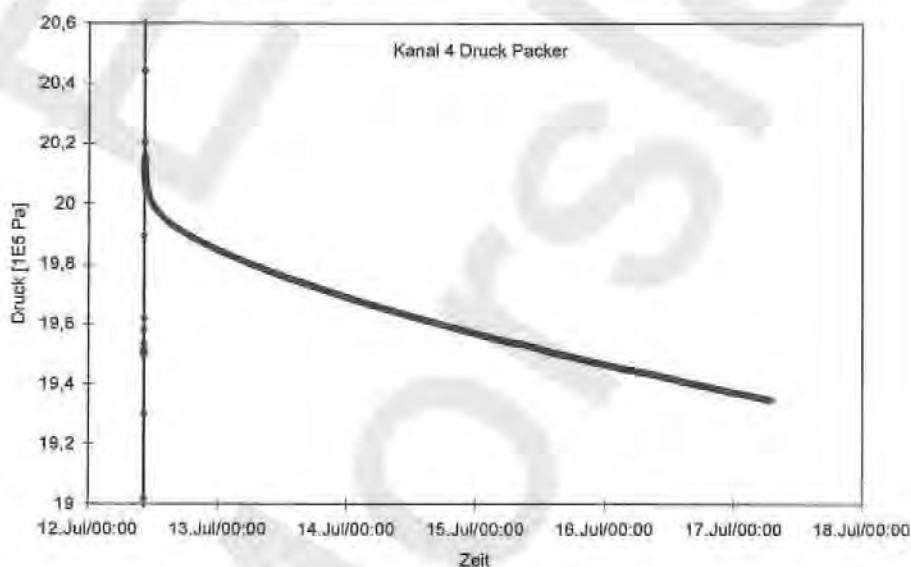


Abbildung 29: Test 527101/2, Verlauf des Packerdruckes

Zur Kontrolle etwaiger Packerumläufigkeiten wird der Druck im Bohrlochtiefsten registriert. Daß im hier vorgestellten Test keine störenden Packerumläufigkeiten aufgetreten sind, folgt schon aus der geringen Änderung des Intervalldruckes und wird durch den in Abbildung 30 dargestellten Verlauf bestätigt. Danach ändert sich der im Bohrlochtiefsten gemessene Druck nur während des Packerens und bleibt anschließend nahezu konstant.

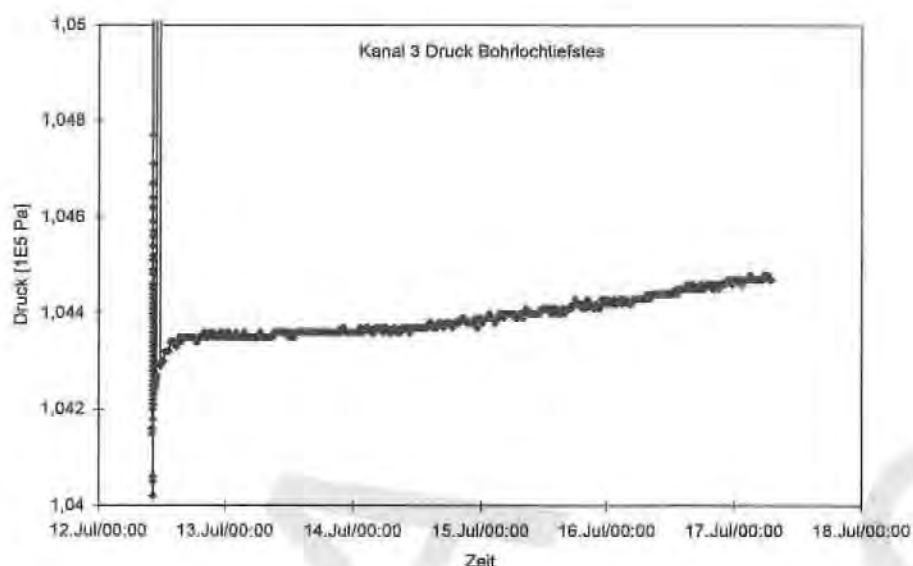


Abbildung 30: Test 527101/2, Druckverlauf im Bohrloch tiefsten

Zur Auswertung des Tests muß der gemessene Druckverlauf im Intervall nach dem im Abschnitt 3.4.1 erläuterten Verfahren korrigiert werden. Um die Auswirkung dieser Korrektur zu demonstrieren, werden im Folgenden zwei unterschiedliche Leckraten unterstellt.

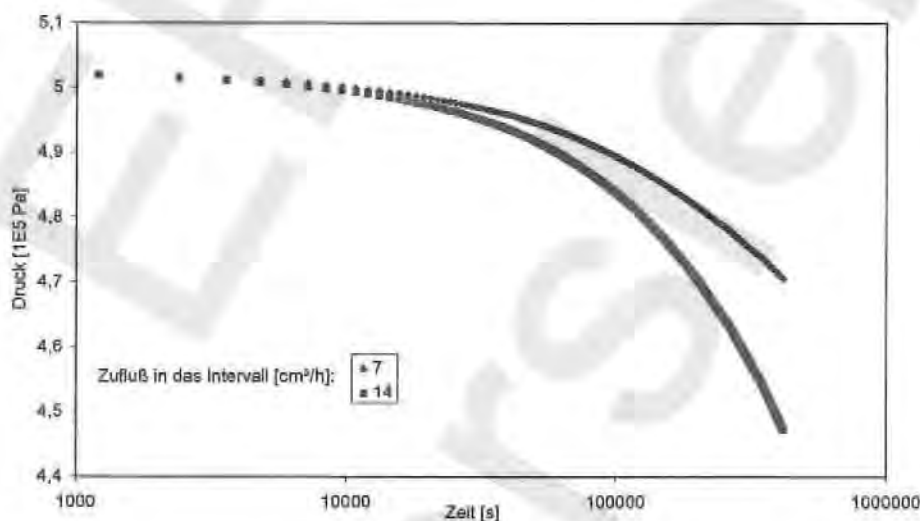


Abbildung 31: Test 527101/2, korrigierte Druckverläufe

In Abbildung 31 sind über einer logarithmischen Zeitachse die korrigierten Druckverläufe eingezeichnet, die sich ergeben, wenn der Zufluß aus dem Packer in das Intervall mit $7 \text{ cm}_s^3/\text{h}$ (obere Kurve) bzw. mit $14 \text{ cm}_s^3/\text{h}$ (untere Kurve) angesetzt wird. Diese Leckraten liegen unter- bzw. oberhalb der in den regulären Auswertungen angesetzten $12,3 \text{ cm}_s^3/\text{h}$ für Testausrüstung 1 und $10,6 \text{ cm}_s^3/\text{h}$ für Testausrüstung 2. Für die Umrechnung der Echtzeit in die Zeitskala der Abbildung 31 wurde der Zeitpunkt, an dem die Injektion beendet war und das Testintervall geschlossen wurde, auf Null gesetzt.

Der Vergleich der beiden Kurven in Abbildung 31 zeigt, daß die Annahme unterschiedlicher Leckraten erst in der späteren Testphase für den Druckverlauf bestimmend ist. In den ersten

Stunden sind die unterschiedlichen Leckraten für die sich ergebenden korrigierten Druckverläufe belanglos.

Bei einer Variation der Permeabilität und bei Annahme einer Porosität von 0,5 % (s. Abschnitt 3.4.1.3) werden die in Abbildung 32 dargestellten Druckverläufe berechnet. Danach führt die mit $14 \text{ cm}_\text{sc}^3/\text{h}$ korrigierte Druckmessung auf eine Permeabilität von $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ und die mit $7 \text{ cm}_\text{sc}^3/\text{h}$ korrigierte Druckmessung auf $5 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$. Um zu demonstrieren, wie gut die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung mit diesen Permeabilitätswerten ist, sind zusätzlich die von den Meßkurven deutlich unterscheidbaren Druckverläufe für $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ und $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ eingezeichnet.

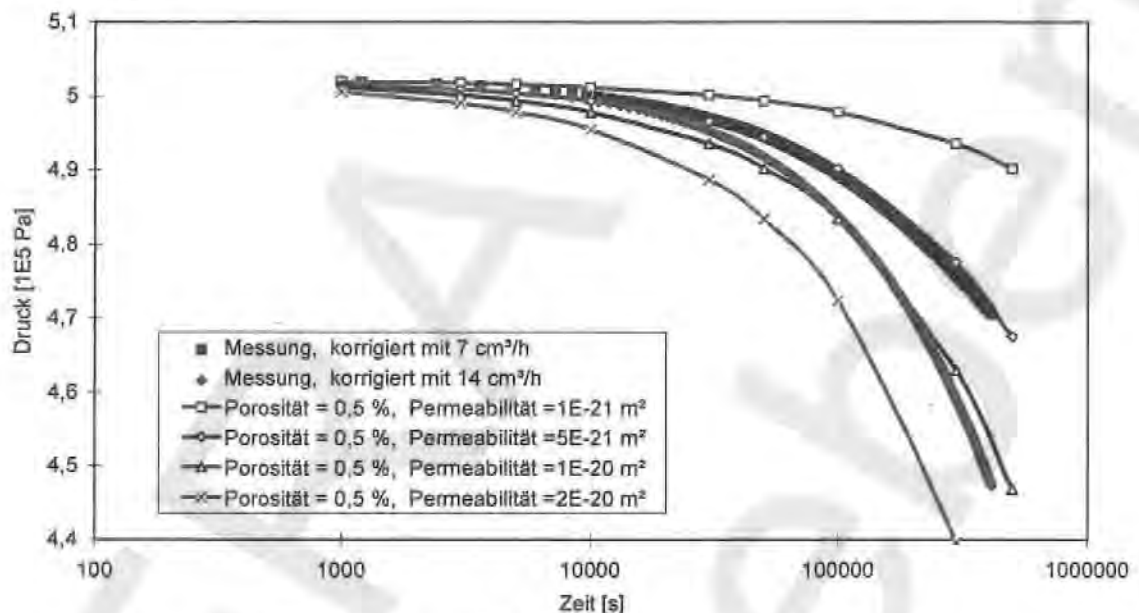


Abbildung 32: Test 527101/2, Eingrenzung der Permeabilität

Als Ergebnis dieses Tests ist anzugeben $k \leq 10^{-20} \text{ m}^2$.

In den folgenden Abschnitten sind Druckverläufe über Echtzeiten grundsätzlich als gemessenen Drücke eingezeichnet und in halblogarithmischen Diagrammen grundsätzlich die entsprechend Abschnitt 3.4.1 korrigierten Drücke eingetragen.

4.1.1.1 Bohrungen RB 522, 523 und 524

Die Bohrungen RB 522, 523 und 524 wurden auf der 2. Sohle, Ostquerschlag, Kali-Lager C mit je 15 m Länge abgeteuft. Die Richtungen liegen zwischen 40 und 45 gon gegen Nord, die Neigungen zwischen -10 und +10gon.

Die Bohrung RB 524 setzt im Kaliflöz Staßfurt (z2SF) an und durchörtert das Decksteinsalz (z2DS), den gebänderten Deckanhydrit (z2DA), den Grauen Salzton (z3GT), das Leinekarbonat (z3LK) und den Hauptanhydrit (z3HA). Die Bohrungen RB523 und RB522 setzen erst im Deckanhydrit (z2DA) bzw. im Grauen Salzton (z3GT) an, enden aber ebenfalls im Hauptanhydrit (z3HA). Der Hauptanhydrit wird in Teufen zwischen 2 m und 4,2 m erreicht.

Die Bohrkerne aus dem Kaliflöz und dem Steinsalz (z2SF und z2DS) weisen Brüche auf, die wahrscheinlich durch den Bohrvorgang verursacht wurden. Tonige Schichten im Deckanhydrit (z2DA) und im Grauen Salzton (z3GT) sind durch zahlreiche feine Risse, Brüche und Klüfte zerlegt, die Mineralneubildungen von Carnallit, Steinsalz und Anhydrit aufweisen. Das Leinekarbonat (z3LK) ist ebenfalls von einigen Rissen, Brüchen und Klüften mit Mineralneubildungen durchsetzt, ist aber insgesamt kompakter als die tonigen Lagen. Im Anhydrit (z2DA und

z3HA) treten meist glatt durchschlagende Brüche mit einer Neigung von ca. 45° zur Bohrachse auf, die den Bohrkern zerlegen. Die Bruchflächen sind häufig mit Carnallit belegt, der aber den Porenraum nicht vollständig schließt.

Bohrung RB 522

Zu Beginn der Tests in dieser Bohrung war unklar, wie sich die durchbohrten Gesteinsschichten verhalten würden und ob nicht infolge Bohrlochkonvergenz oder mangelnder Bohrlochstabilität der Doppelpacker im Bohrloch fest werden könnte. Deshalb wurde jeweils zum Schichtende die Testgarnitur gezogen, so daß die Testdauern nur wenige Stunden betragen. Erst nachdem sich gezeigt hatte, daß die Bohrlöcher auch nach Standzeiten von mehreren Tagen noch problemlos mit den Doppelpackern befahren werden konnten, wurden längere Tests durchgeführt.

Die Ergebnisse der Tests sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in Bohrung RB 522

Bohrung RB522	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
	Anhydrit	1E -20	Pulstest	< 1	2,1	3,6	522201-2
	Anhydrit	> 1E -20	Pulstest	< 1	4,6	15	522203-4
	Anhydrit	> 1E -20	Pulstest	< 1	4,6	15	522205-7
	Anhydrit	5E -21	Pulstest	< 1	4,1	5,6	522208-9
	Anhydrit	4E -19	Pulstest	< 1	11,4	12,9	522210-11
	Anhydrit	2E -19	Pulstest	< 1	9,4	10,9	522212-13
	Anhydrit	3E -18	Pulstest	< 1	6,9	8,4	522214-15
	Anhydrit	4E -18	Pulstest	1	6,9	8,4	522216-17
	Anhydrit	1E -20	Pulstest	< 1	5,5	7	522120
	Anhydrit	1E -20	Pulstest	< 1	7,9	9,4	522121
	Anhydrit	5E -19	Pulstest	< 1	10,9	12,4	522122
	Anhydrit	3E -18	CR-Test	7	13,4	15	522123-24

In mehreren Intervalltests in dieser Bohrung wurden Druckanstiege im Bohrloch tiefsten festgestellt, die als Fluidzutritt aus dem Gebirge gewertet werden mußten, da sie die Packerleckraten in das Bohrloch tiefste übertrafen und bei stabilem Intervalldruck nicht als Umläufigkeit gedeutet werden konnten. Die Zutrittsraten waren unterschiedlich hoch und lagen zwischen 20 und über 1000 cm_{sc}³/h.

Die zeitliche Entwicklung der festgestellten Zutritte aus dem Gebirge ist in Abbildung 33 dargestellt. Aus Abbildung 33 wird ersichtlich, daß die Entwicklung der Zutrittsraten keinem einheitlichen Trend folgt. Nachdem in den Tests am 11. und 12. September in den Bereich 5,6 - 15 m insgesamt ca. 200 dm³ Gas verpreßt worden waren, traten im Test am 13. September 1996 mit einer vergleichsweise großen Rate im Bereich 6,6 - 15 m kumulativ ca. 3,4 dm³ zu. Auch die erhöhte Zutrittsrate am 18. September trat in einem Bereich auf, in den vorher Gas verpreßt wurde. Ohne zwischenzeitliche Gasinjektion nehmen die Zutrittsraten vom 13. bis 17. und vom 18. bis 20. September ab.

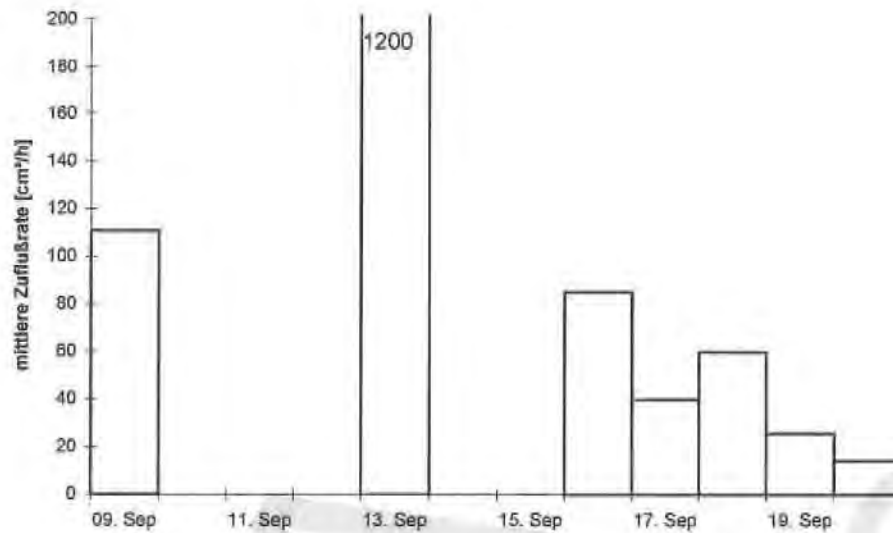


Abbildung 33: Zutrittsraten in das Bohrloch RB 522

Die festgestellten Zutritte sind daher eindeutig als Artefakte zu bewerten, und nicht als Freisetzung von initial im Gebirge vorhandenen Fluiden. Das kann auch für den Zutritt im ersten Test angenommen werden, da während des Abteufens der Bohrung am 3. bis 5. September Spülluft unter hohem Druck injiziert wurde.

Insgesamt ergibt sich für die Bohrung RB 522 der in Abbildung 34 dargestellte teufenabhängige Verlauf der Permeabilität. Danach erweist sich der Anhydrit bezüglich seiner Permeabilität als heterogen, er ist bereichsweise dicht, kann aber auch Durchlässigkeiten bis 10^{-17} m^2 aufweisen. In dieser und den folgenden Abbildungen sind Permeabilitäten $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ zusammengefaßt dargestellt.

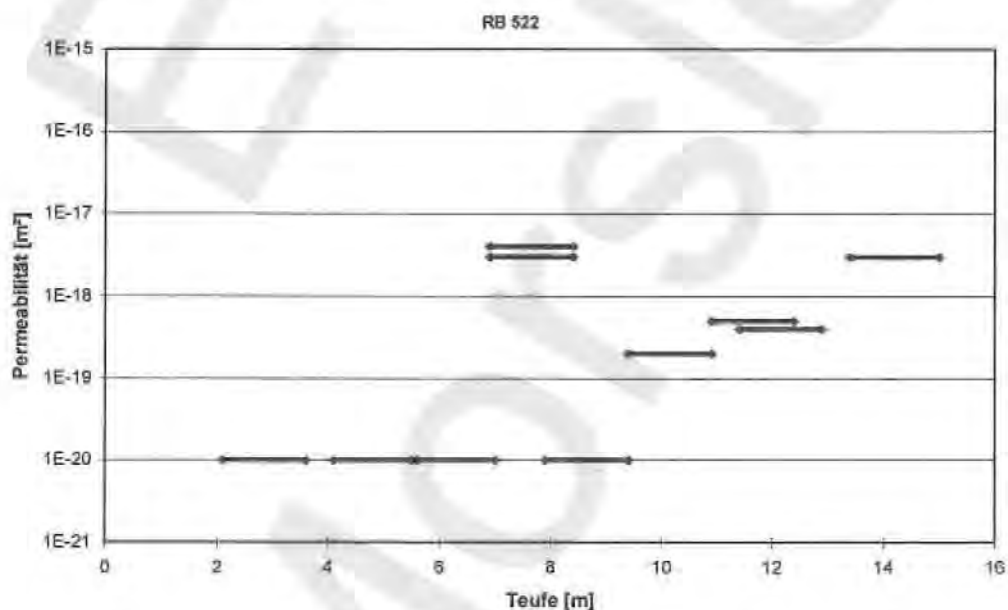


Abbildung 34: Permeabilitätsverlauf RB 522

In der Darstellung sind die Ergebnisse der einzelnen Intervalltests als durchgezogene Balken eingetragen. Der Test im Intervall 7,9 - 9,4 m hat eine Permeabilität von 10^{-20} m^2 ergeben. Daher ist die im Intervall 6,9 - 8,4 m festgestellte Durchlässigkeit nicht dem gesamten Intervall zuzuschreiben, sondern nur dem Bereich 6,9 - 7,9 m. Da das Testresultat immer das Produkt aus

Permeabilität und Mächtigkeit ist, ändert sich die errechnete Permeabilität, wenn eine andere Mächtigkeit der permeablen Zone unterstellt wird. In die Abbildung 34 könnte folglich anstatt der Permeabilität $3 \text{ bis } 4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ für das gesamte Intervall $6,9 - 8,4 \text{ m}$ die Permeabilität $4,5 \text{ bis } 6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ für das Intervall $6,9 - 7,9 \text{ m}$ eingetragen werden.

Bohrung RB 523

Der in dieser Bohrung im Intervall $1,2 - 2,7 \text{ m}$ anstehende Tonstein und Magnesit wurde im Versuch 523103/4 getestet. Die ermittelte Permeabilität liegt unter 10^{-20} m^2 . Im Übergang Magnesit/Anhydrit wurde eine Permeabilität von $1 - 2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ festgestellt. Die gleiche Permeabilität wurde in größerer Teufe im Anhydrit gemessen.

Die Ergebnisse der Tests sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in Bohrung RB 523

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB523	Anhydrit	5E -21	Pulstest	< 1	5,8	7,3	523101-2
	Ton/Magnesit	5E -21	Pulstest	< 1	1,2	2,7	523103-4
	Magnesit/Anhydrit	2E -20	Pulstest	13	2,76	4,26	523201-4
	Anhydrit	2E -20	Pulstest	13	3,9	5,4	523205-6
	Anhydrit	2E -20	Pulstest	7	9	10,5	523207-8

Insgesamt ergibt sich der in Abbildung 35 dargestellte Permeabilitätsverlauf.

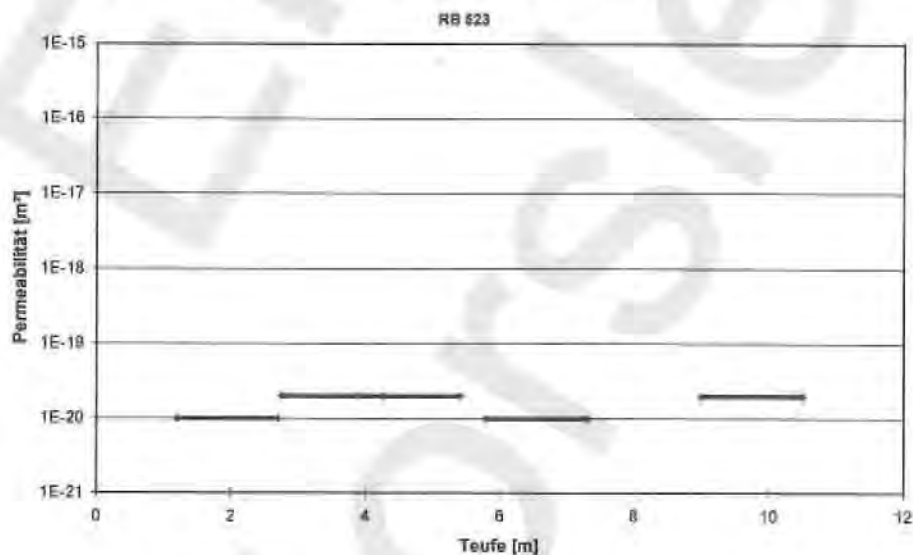


Abbildung 35: Permeabilitätsverlauf RB 523 über der Teufe

Wie in der Bohrung RB 522 wurden in den ersten Tests in der Bohrung RB 523 Zutritte im Bohrloch tiefsten festgestellt. Die verglichen mit dem ersten Test in RB 522 größere Zutrittsmenge im Test 523102/3 folgt daraus, daß die Testarbeiten in RB 523 bereits zwei Tage nach Fertigstellung der Bohrung begonnen wurden, während dieser Zeitraum bei der RB 522 vier Tage betrug.

Bohrung RB 524

Die vorangegangenen Tests an dieser Lokation hatten gezeigt, daß erhöhte Permeabilitäten im Anhydrit auftreten können, und daß die Stoßnähe der oberen Bohrlochabschnitte keine Erhöhung der Permeabilität bewirkt. In der Bohrung RB 524 wurde daher zunächst ein Test im Bohrlochtiefsen unterhalb 5,4 m durchgeführt. Vor Durchführung des Tests 524101/2 stand die Bohrung neun Tage offen, so daß Zutritte von in das Gebirge verpreßter Spülungsluft nicht erwartet wurden. Die ermittelte Permeabilität beträgt ca. $4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$.

Wegen der Heterogenität des Anhydrits, die sich aus Abbildung 34 ablesen läßt, ist jedoch nicht davon auszugehen, daß dieser Permeabilitätswert auch in kürzeren Intervallen gefunden wird. Tatsächlich zeigen Tests in kürzeren Intervallen, daß der Abfluß aus dem Bohrloch im Intervall 11,4 - 12,9 m erfolgt, während die anderen Bereiche keinen Anteil am Druckabfall im ersten Test haben. Das wird im Test 524107/8 für das Intervall 8,9 - 10,4 m gemessen und ergibt sich indirekt für die außerhalb des Intervalls 11,4 - 12,9 m liegenden Bohrlochbereiche aus dem Vergleich der Abflüsse in den Tests 524101/2 und 524109/10 mit der im Test 524105/6 in das Gebirge verpreßten Gasmenge.

Ein zusätzlicher Tests im Intervall 2,9 - 4,4 m ergibt für die dort anstehende Gesteinsabfolge Tonstein/Magnesit/Anhydrit die Permeabilität 1 bis $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$.

Die Ergebnisse der Tests in der Bohrung RB 524 sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in Bohrung RB 524

Bohrung RB524	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
	Anhydrit	4E -19	Pulstest	1	5,4	15,1	524101-2
	Ton/Magn./Anhydrit	1E -20	Pulstest	4	2,9	4,4	524103-4
	Anhydrit	5E -18	Pulstest	2	11,4	12,9	524105-6
	Anhydrit	5E -21	Pulstest	5	8,9	10,4	524107-8
	Anhydrit	2E -16	Pulstest	2	11,4	15	524109-10

Insgesamt folgt der in Abbildung 36 dargestellte Permeabilitätsverlauf. Dort ist zusätzlich der Permeabilitätsverlauf eingezeichnet, der sich bei Berücksichtigung der Überlappung von Testintervallen ergibt.

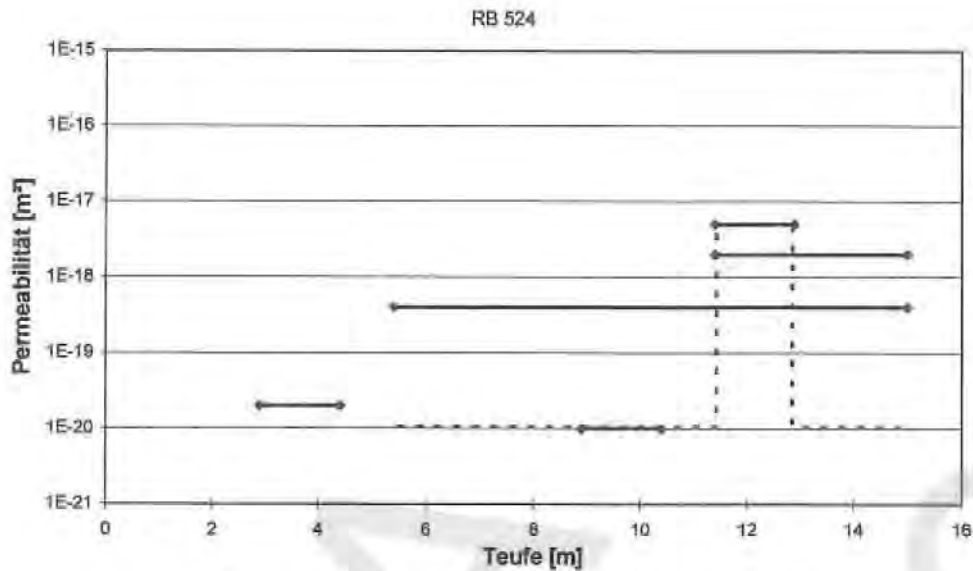


Abbildung 36: Permeabilitätsverlauf RB 524 über der Teufe

4.1.1.2 Bohrungen RB 525, 526 und 527

Die Bohrungen RB 525, 526 und 527 wurden im Abbau 2 nördl. auf der 2. Sohle mit Längen zwischen 23 und 29 m abgeteuft. Die Bohrungen wurden senkrecht zum Stoß mit Richtungen um 275 gon und leichter Neigung zwischen -3 und +15 gon gebohrt. Die Bohrungen sind im Steinsalz z3LS angesetzt und enden im Anhydrit z3HA, den sie auf einer Länge von 0,5 bis 1,5 m aufschließen.

Die an dieser Lokation erbohrten Steinsalz-Kerne weisen einige Anhydritlinien und vereinzelt Risse auf, die jedoch keinen makroskopischen Porenraum erkennen lassen. Auch der Anhydrit ist kompakt ausgebildet ohne makroskopisch erkennbaren Porenraum.

An dieser Lokation wurden sechs Permeabilitätstest durchgeführt, von denen vier neben dem Steinsalz auch den Anhydrit im Testintervall beinhalten. Die Ergebnisse der Tests in den Bohrungen RB 525, 526 und 527 sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in den Bohrungen RB 525, 526 und 527

	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
Bohrung	Steinsalz/Anhydrit	1E -21	Pulstest	6	3,6	23,3	525101 - 4
RB 525	Steinsalz/Anhydrit	1E -22	Pulstest	12	3,54	23,3	525105 - 6
Bohrung	Steinsalz/Anhydrit	1E -22	Pulstest	13	3,6	27,19	526201 - 4
RB 526	Steinsalz	1E -20	Pulstest	13	1,1	2,6	525205 - 8
Bohrung	Steinsalz	1E -20	Pulstest	5	1,5	3	527101 - 2
RB 527	Steinsalz/Anhydrit	1E -23	Pulstest	7	4	28,61	527103 - 5

Bohrung RB 525

Der Test 525101/4 wurde im Bohrlochtiefsten zwischen 3,6 und 23,3 m, also im Steinsalz und Anhydrit durchgeführt. Aus dem gemessenen Druckverlauf ergibt sich eine Permeabilität zwischen 10^{-21} m^2 und 10^{-22} m^2 .

Dieser Test wurde mit einem um wenige cm verschobenen Packer im Versuch 525105/6 wiederholt. Da der Test 525105/6 auf fast zwei Wochen ausgedehnt wurde, eignet er sich gut zur Quantifizierung der Packerleckage. Die Auswertung dieses Tests führt wie im Vorversuch auf eine Permeabilität zwischen 10^{-21} m^2 und 10^{-22} m^2 .

Aus diesem Wert läßt sich analog zu den Überlegungen im Abschnitt 0 ableiten, daß die maximal mögliche Permeabilität in einem Intervalltest auf 1,5 m Länge kleiner als 10^{-20} m^2 ist. Intervalltests wurden daher nicht durchgeführt.

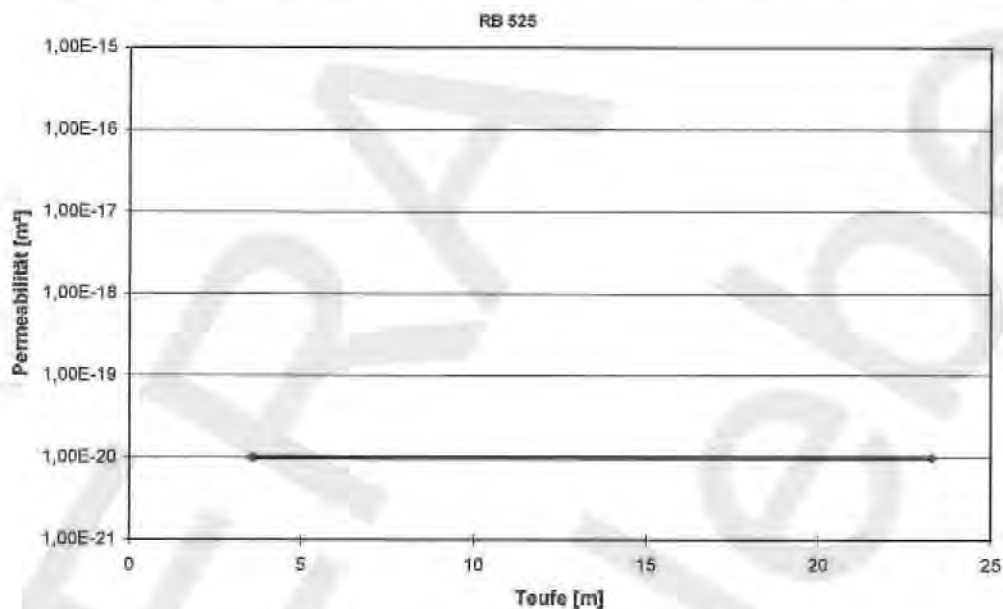


Abbildung 37: Permeabilitätsverlauf RB 525 über der Tiefe

Bohrung RB 526

Auch in der Bohrung RB 526 wurde zunächst das Bohrlochtiefste auf einer möglichst großen Länge getestet. Dabei wurde im Test 526201/4 eine Permeabilität von ca. 10^{-22} m^2 für den Abschnitt 3,6 bis 27,19 m ermittelt.

Bei unverändertem Packersitz wurde anschließend das Intervall 1,1 bis 2,6 m getestet. Der Druck im Intervall ändert sich während der fast zweiwöchigen Meßdauer nur um ca. $7 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ und damit kaum mehr als 1 % des Anfangswertes. Daraus ergibt sich eine Permeabilität nahe 10^{-20} m^2 .

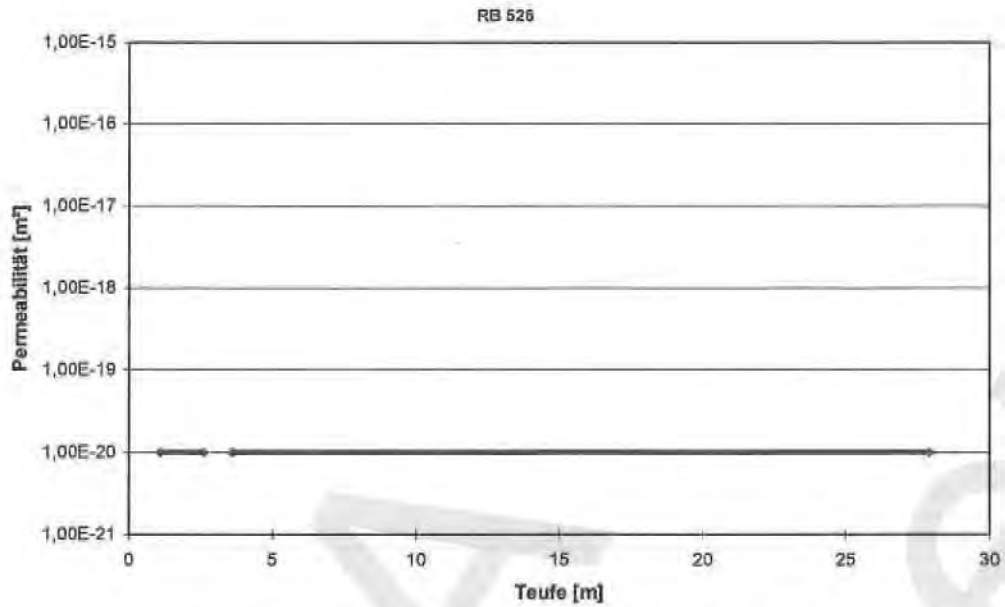


Abbildung 38: Permeabilitätsverlauf RB 526 über der Teufe

Bohrung RB 527

Der in der Bohrung RB 527 durchgeführte Intervalltest 527101/2 wurde bereits im Abschnitt 4.1 vorgestellt. Die Auswertung hatte auf eine Permeabilität kleiner 10^{-20} m^2 geführt.

Bei dem anschließend im Bohrlochtiefsten zwischen 4 und 28,61 m durchgeführten Test wurde, abgesehen von einem Anfangseffekt, über sieben Tage ein fast konstanter Druck gemessen. Der von der Sonde im Bohrloch registrierte Druck weist eine Druckänderung deutlich kleiner als 0,1 % des Anfangswertes aus. Die Auswertung des gemessenen Druckverlaufes führt auf eine Permeabilität von ca. 10^{-23} m^2 .

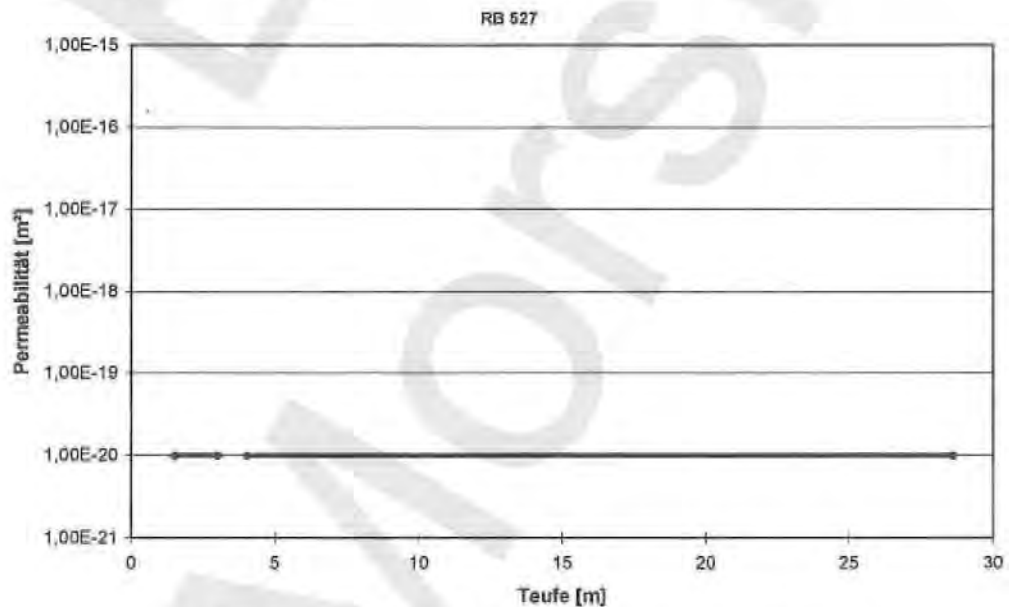


Abbildung 39: Permeabilitätsverlauf RB 527 über der Teufe

Wegen des im Abschnitt 3.4.1.1 beschriebenen Verfahrens zur Korrektur von Packerleckagen ergibt sich für undurchlässiges Gebirge im Intervall zwischen den Packern rechnerisch eine größere Permeabilität als im Bohrlochtieftsten. Der Umstand, daß für die Bohrungen RB 526 und 527 im stoßnahen Intervall Permeabilitäten von 10^{-20} m^2 und im Bohrlochtieftsten kleinere Permeabilitäten ermittelt wurden, beruht daher auf der Auswertemethodik und darf nicht als Permeabilitätsanstieg zum Stoß hin mißdeutet werden.

4.1.1.3 Bohrungen RB 528, 529 und 530

An dieser Lokation 3 sollte, wie in den Bohrungen RB 525, 526 und 527, festgestellt werden, welche Durchlässigkeiten sich am Übergang zweier Gesteine mit unterschiedlichem Verformungsverhalten in Nachbarschaft zu einem großen Hohlraum einstellen. Die Ergebnisse aus den Bohrungen RB 525, 526 und 527 zeigen, daß das Steinsalz am Übergang zum Anhydrit keine erhöhten Durchlässigkeiten aufweist und auch im Anhydrit unmittelbar an der Grenze zum Steinsalz keine erhöhte Permeabilität auftritt. Gleichzeitig hatten die Messungen in den Bohrungen RB 522, 523 und 524 den Anhydrit als heterogen ausgewiesen. Zur weiteren Absicherung dieses Befundes wurden die Bohrungen RB 528, 529 und 530 über die Grenze Steinsalz/Anhydrit hinaus noch 10 m tief in den Anhydrit hinein geteuft.

Die Bohrungen wurden auf der 2. Sohle im Abbau 1S mit 0 bis -10 gon Neigung in Richtung Osten abgeteuft. Sie erreichen Längen von 27,76 m, 31,66 m bzw. 37,83 m. Die Bohrungen setzen im Bank-, Bändersalz (z3BK/BD) an und enden im Hauptanhydrit (z3HA). Das Orangesalz (z3OS) und das Liniensalz (z3LS) konnten nicht eindeutig ausgegliedert werden.

Im Steinsalz sind häufig kleine unregelmäßige Entlastungsrisse zu erkennen. In grobkristallinen Bereichen durchschlagen Kristallspaltflächen den Kern. Dabei sind die Bruchflächen glatt und passen genau aneinander. Klüfte im Salz mit unregelmäßigen Kluftflächen treten in den Bohrungen RB528 und RB529 nur direkt am Stoß, in der Bohrung RB530 auch an der Grenze zum Hauptanhydrit auf. In Abbildung 40 wird der von RB 530 erbohrte Übergang vom Steinsalz zum Anhydrit gezeigt.



Abbildung 40: Kluft am Übergang Steinsalz (Kluft geschlossen) / Anhydrit (Kluft offen), Bohrung RB 530, Länge der unteren Bildkante entspricht ca. 20 cm

Klüfte, die den Übergang Steinsalz/Anhydrit durchschlagen, setzen sich im Anhydrit als leicht geöffnete Spalten fort, deren Flächen z.T. mit Carnallit belegt sind.

Klüfte, die z.T. offen stehen und eine leichte Mineralneubildung aufweisen, treten im Hauptanhydrit in allen drei Bohrungen auf. Abbildung 41 zeigt eine solche offene Kluft aus der Bohrung RB 530, teilweise mit Carnallitbelägen.



Abbildung 41: Beispiel für mit Carnallit belegte offene Kluft, Bohrung RB 530, Länge der unteren Bildkante entspricht ca. 20 cm

Die Carnallitbeläge auf den Kluftflächen zeigen an, daß in den Klüften Lösungen vorhanden waren. Die daraus auf den Kluftflächen gebildeten Sekundärmineralisationen können auch zum vollständigen Verschließen einer Kluft führen, wie das Beispiel in Abbildung 42 aus der Bohrung RB 528 zeigt.

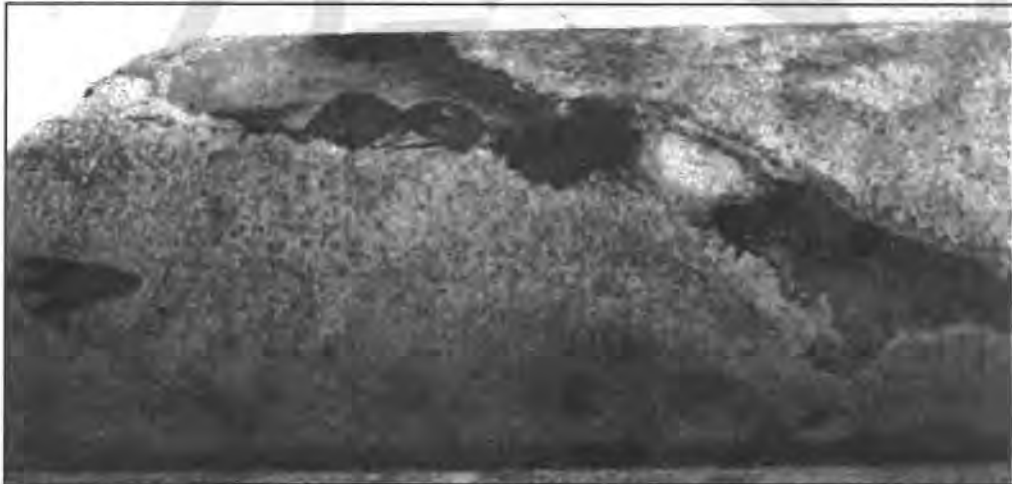


Abbildung 42: Beispiel für eine ausgeheilte Kluft, Bohrung RB 528, Länge der unteren Bildkante entspricht ca. 20 cm

Durch das Vorhandensein von Klüften ohne Sekundärmineralisationen (Abbildung 43, Bohrung RB 530) wird belegt, daß nicht auf allen Klüften Flüssigkeiten zirkuliert sind. Folglich können in einer zusammenhängenden Anhydritscholle Kluftsysteme existieren, die keine hydraulische Verbindung zueinander besitzen oder die zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstanden sind.



Abbildung 43: Beispiel für offene Klüfte, Bohrung RB 530, Länge der unteren Bildkante entspricht ca. 20 cm

Bohrung RB 528

In dieser Bohrung wurden in 1,5 m-Intervallen für Steinsalz durchgehend Permeabilitäten $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ festgestellt.

Eine mit 1 bis $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ nur wenig erhöhte Permeabilität wird im Intervall 16,16 - 17,66 m ermittelt. In diesem Intervall ist neben Steinsalz auch der ab 17,17 m anstehende Anhydrit enthalten. In den anschließenden Intervallen im Anhydrit werden sehr große Permeabilitäten bis 10^{-13} m^2 gemessen. Insgesamt ergibt sich der in Abbildung 44 dargestellte Permeabilitätsverlauf.

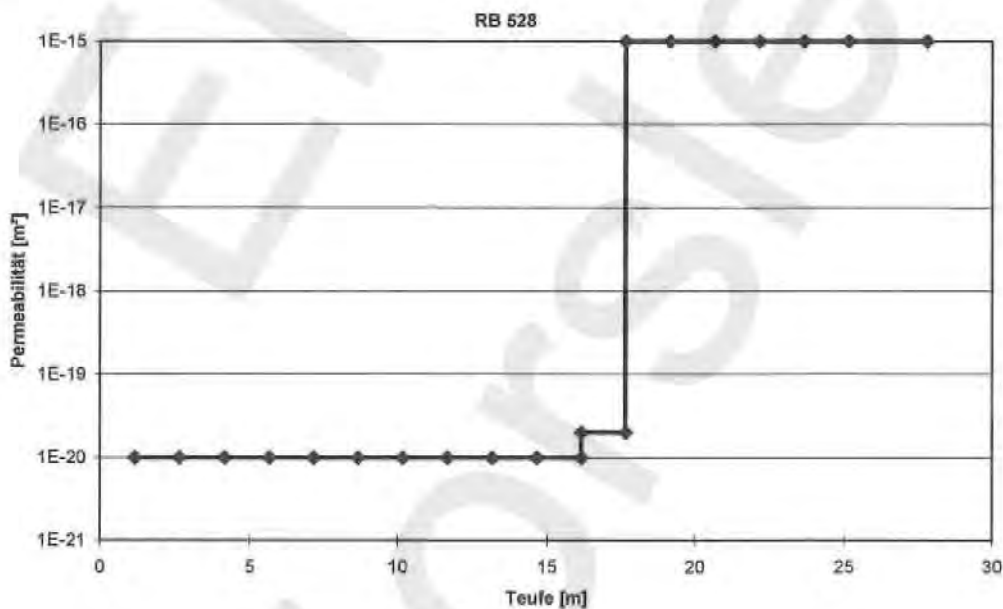


Abbildung 44: Permeabilitätsverlauf RB 528

In zwei nachfolgenden Tests wurde untersucht, ob Anzeichen für eine Begrenzung des angetroffenen Poren- bzw. Kluftvolumens gefunden werden können. Im Test 528101/4 wurde fast 2 Wochen lang in das Bohrloch tiefste mit einer Rate von $20 \text{ dm}^3/\text{min}$ injiziert. Der Druckverlauf ergab keinen Hinweis auf eine Begrenzung der Wegsamkeiten. Im Intervall zeigt der Druck den gleichen Verlauf wie im Bohrloch tiefsten, beide Bohrlochabschnitte kommunizieren also über das klüftige Gebirge miteinander.

Im abschließenden Test 528105/10 wurden beide Packer in geringer Teufe im Steinsalz gesetzt. In diesem Test waren Intervall und Bohrlochtiefstes hydraulisch isoliert, wie der Vergleich bei der Druckverläufe belegt. Der Druck im Bohrlochtiefsten zeigt anfangs das aus den Tests in durchlässigen Bohrlochabschnitten bekannte Verhalten: Der Druck steigt zunächst schnell an und ändert sich nach wenigen Minuten kaum noch. Der stabilisierte Druck beträgt hier ca. $1,7 \cdot 10^5$ Pa. Während der anschließend über mehrere Tage fortgesetzten Injektion wird ein sehr unregelmäßiger Druckverlauf beobachtet, dessen Ursachen nicht bekannt sind. Auch für diese Tests ergibt sich ein Permeabilitätswert größer als 10^{-15} m^2 .

Alle in der Bohrung RB 528 durchgeführten Tests sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 528

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB528	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	14	21,5	27,76	528101-4
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	14	4	27,76	528105-10
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -15	Pulstest	< 1	3,66	27,76	528201
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	1	1,16	2,66	528202-3
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	2,66	4,16	528204-5
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	4,16	5,66	528206-7
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	1	5,66	7,16	528208-9
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	4	7,16	8,66	528210-11
	Steinsalz	2E -21	Pulstest	1	8,66	10,16	528212-13
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	10,16	11,66	528214-15
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	11,66	13,16	528216-17
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	3	13,16	14,66	528218-19
	Steinsalz	2E -21	Pulstest	1	14,66	16,16	528220-21
	Steinsalz/Anhydrit	2E -20	Pulstest	1	16,16	17,66	528222-23
	Anhydrit	1E -13	CR-Test	< 1	17,66	19,16	528224
	Anhydrit	5E -14	CR-Test	< 1	19,16	20,66	528225
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	< 1	20,66	22,16	528226
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	< 1	22,16	23,66	528227
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	< 1	23,66	25,16	528228
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	< 1	25,16	27,76	528229

Bohrung RB 529

In dieser Bohrung wurden für den Teufenbereich 1,15 - 28,15 m Permeabilitäten $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ nachgewiesen. Erst im Bereich 28,05 - 31,66 m (Endteufe) werden durchlässige Bohrlochabschnitte gefunden. Die Permeabilitäten liegen hier deutlich über 10^{-15} m^2 . Die in der Bohrung RB 529 durchgeführten Tests sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 529

Bohrung RB529	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -20	CR-Test	<1	3,65	31,7	529201
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	1	1,15	2,65	529202-3
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	2,65	4,15	529204-5
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	3	4,15	5,65	529206-7
	Steinsalz	2E -21	Pulstest	1	5,65	7,15	529208-9
	Steinsalz	2E -21	Pulstest	1	7,15	8,65	529210-11
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	8,65	10,15	529212-13
	Steinsalz	2E -21	Pulstest	1	10,15	11,65	529214-15
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	3	11,65	13,15	529216-17
	Steinsalz	2E -21	Pulstest	1	13,15	14,65	529218-19
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	14,65	16,15	529220-21
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	16,15	17,65	529222-23
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	17,65	19,15	529224-25
	Steinsalz/Anhydrit	5E -21	Pulstest	3	19,15	20,65	529226-27
	Anhydrit	2E -21	Pulstest	1	20,65	22,15	529228-29
	Anhydrit	2E -21	Pulstest	1	22,15	23,65	529230-31
	Anhydrit	1E -20	Pulstest	1	23,65	25,15	529232-33
	Anhydrit	2E -21	Pulstest	1	25,15	26,65	529234-35
	Anhydrit	5E -21	Pulstest	3	26,65	28,15	529236-37
	Anhydrit	2E -13	CR-Test	1	28,05	29,55	529238-39
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	29,55	31,66	529240-41

Insgesamt ergibt sich der in Abbildung 45 dargestellte Permeabilitätsverlauf. Bemerkenswert ist, daß der ab 20,5 m Teufe anstehende Anhydrit hier im Gegensatz zur Bohrung RB 528 auf $\frac{3}{4}$ der aufgeschlossenen Länge keine erhöhte Permeabilität besitzt.

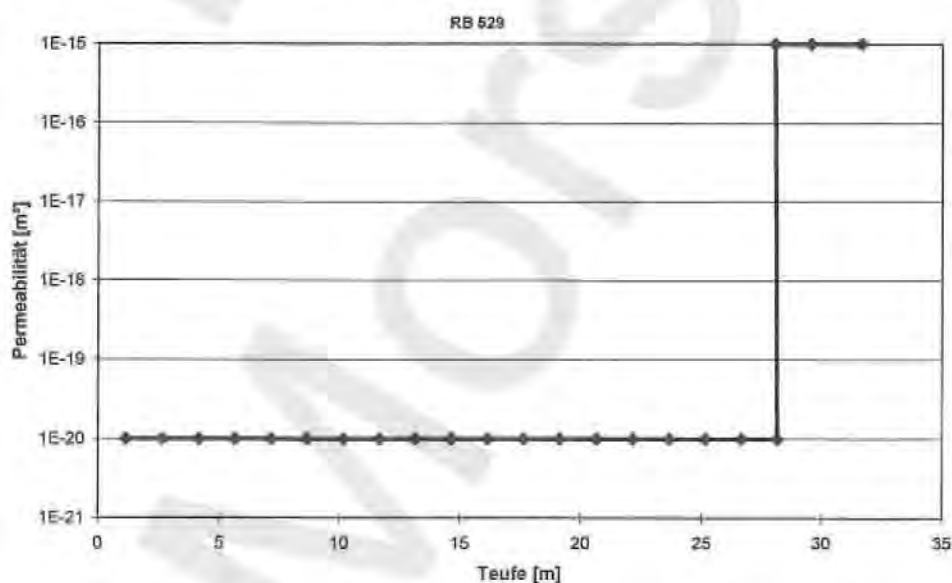


Abbildung 45: Permeabilitätsverlauf RB 529

Bohrung RB 530

In der Bohrung RB 530 wurden in 1,5 m-Intervallen in Teufen zwischen 1,12 und 8,62 m geringe Durchlässigkeiten im Bereich 1 bis $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ festgestellt. Zwischen 8,66 m und 20,66 m sind die Permeabilitäten $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$. In einem Test im Intervall 20,66 - 22,16 m wird durch die Injektion von $3 \text{ dm}^3/\text{min}$ über 3 Tage kein meßbarer Druckanstieg verursacht. In diesem hochdurchlässigen Bohrlochabschnitt ist neben Steinsalz der Anhydrit, der ab 21,48 m ansteht, enthalten. Auch in den weiteren Tests in größeren Teufen werden durch fehlende oder marginale Druckanstiege während der Injektion sehr große Permeabilitäten angezeigt. Einzige Ausnahme ist der Test 530149/50 im Bohrlochtieftsten zwischen 35,59 und 37,83 m, in dem eine Permeabilität um 10^{-16} bis 10^{-17} m^2 ermittelt wird.

In Abbildung 46 ist die teufenabhängige Permeabilität dargestellt.

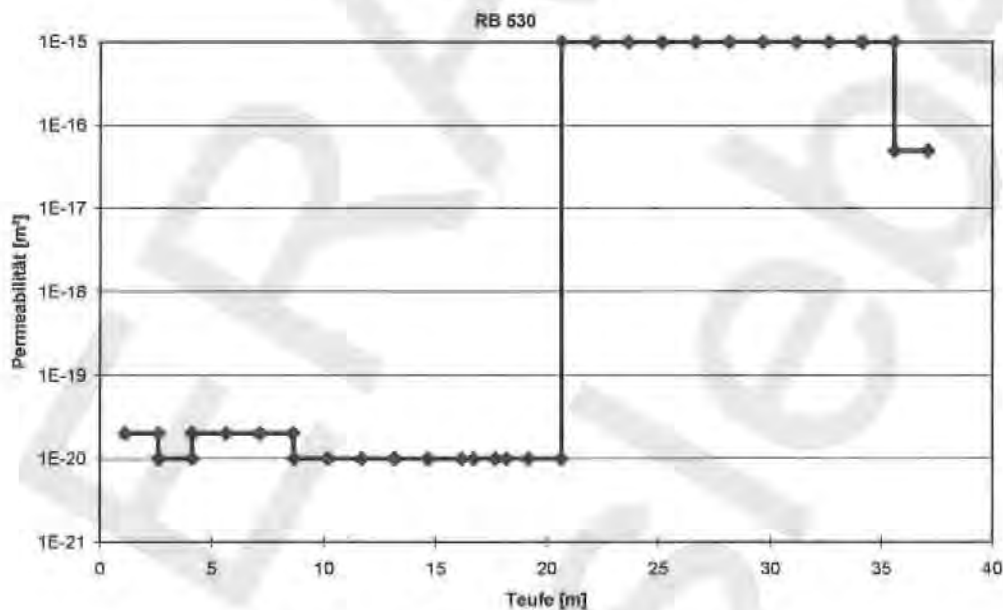


Abbildung 46: Permeabilitätsverlauf RB 530

Nachdem über die gesamte Länge der Bohrung Intervalltests durchgeführt waren, wurde überprüft, ob durch eine Injektion über längere Zeit Anzeichen für eine Begrenzung des Kluftsystems gefunden werden können. Wie schon bei der Bohrung RB 528 konnte keine Begrenzung nachgewiesen werden. Im Test 530210/15 wurde die Bohrung am Bohrlochmund abgesperrt, während eine Injektion in die Bohrung RB 528 erfolgte. Dort wurde im Test 528105/10 ein Druckanstieg auf den dreifachen Atmosphärenwert erreicht, während in der Bohrung RB 530 keine signifikante Druckänderung eintrat. Eine Kommunikation der Bohrungen RB 528 und 530 kann also nicht nachgewiesen werden.

Die in der Bohrung RB 530 durchgeführten Tests sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 530

Bohrung RB530	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -20	CR-Test	<1	3,62	37,83	530101
	Steinsalz	2E -20	Pulstest	1	1,12	2,62	530102-3
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	1	2,62	4,12	530104-5
	Steinsalz	2E -20	Pulstest	1	4,12	5,62	530106-7
	Steinsalz	2E -20	Pulstest	3	5,62	7,12	530108-9
	Steinsalz	2E -20	Pulstest	1	7,12	8,62	530110-11
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	8,66	10,16	530112-13
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	10,12	11,62	530114-15
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	1	11,66	13,16	530116-17
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	3	13,12	14,62	530118-19
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	14,66	16,16	530120-21
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	1	16,66	18,16	530122-23
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	17,66	19,16	530124-25
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	19,16	20,66	530126-27
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	3	20,66	22,16	530128-29
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	22,16	23,66	530130-31
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	23,66	25,16	530132-33
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	25,16	26,66	530134-35
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	26,66	28,16	530136-37
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	3	28,16	29,66	530138-39
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	29,66	31,16	530140-42
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	31,66	32,66	530143-44
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	32,66	34,16	530145-46
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	34,09	35,59	530147-48
	Anhydrit	1E -16	Pulstest	<1	35,59	37,83	530149-50
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	7	20,66	22,16	530201-03
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	6	22,66	24,16	530204-06
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	1	28,16	29,66	530207-08
	Anhydrit	> 1E -15	CR-Test	<1	28,16	29,66	530209
	Anhydrit	Beobachtung der Injektion in RB 528		14	4,5	37,83	530210-15
	Anhydrit	8E -17	Pulstest	<1	35,59	37,83	530149-50

4.1.1.4 Bohrungen RB 531, 532, 533 und 534

Im Zentralbereich der Grube Bartensleben wurden viele Abbaue in großer Nähe zueinander aufgeföhren. Das System der Schweben und Pfeiler zwischen den Abbauen ist daher mechanisch stark belastet. Hier wurden die Bohrungen abgeteuföh, mit denen die Auswirkungen der mechanischen Belastung im Schweben- und Pfeilersystem auf die Permeabilität untersucht werden sollten.

Je zwei Bohrungen wurden in einem Pfeiler und zwei in einer Schwebenbohrungen verlaufen ausschließlich und die Pfeilerbohrungen überwiegend im Steinsalz, eine Pfeilerbohrung durchörtert auf 0,5 m eine Anhydritlage.

Die Pfeilerbohrungen RB 531 und RB 532 wurden auf der 2. Sohle im Abbau 2 N mit 13 m bzw. 15 m Länge in Richtung Nordosten abgeteuft. Sie setzen im Bank-/ Bändersalz (z3BK/BD) an und erreichen bei ca. 12m Länge das Orangesalz (z3OS).

Zahlreiche Kristallspaltflächen durchschlagen die Bohrkerne im größtenteils grobkristallinen Bank-/Bändersalz, wobei die Bruchflächen ganz glatt sind und exakt aneinanderpassen. Außerdem erkennt man über den ganzen Kern verteilt kleinere unregelmäßige Entlastungsrisse. Bei der Bohrung RB531 treten direkt am Stoß mehrere Klüfte mit unregelmäßigen Klufflächen auf. Derartige Brüche finden sich bei der Bohrung RB532 auch in der Mitte des Kernes und gehäuft am Ende. Es ist anzunehmen, daß es sich dabei um durch den Bohrvorgang induzierte Artefakte handelt. Diese Annahme wird durch die Testergebnisse (s.u.) gestützt.

Die Schwebenbohrungen RB 533 und RB 534 wurden in die Sohle des Abbau 1a auf der 2. Sohle mit einem Abstand von ca. 5 m zueinander geteuft. Die Schwebenbohrung zwischen der 2. und der 3a Sohle ist hier ca. 4 m mächtig. Da die Bohrungen nicht durchschlägig sein sollten, beträgt ihre Teufe nur 3,5 m. Sie durchörterten das Liniensalz (z3LS).

Kleinere unregelmäßige Risse treten bei der Bohrung RB534 gehäuft direkt am Stoß, ansonsten bei beiden Bohrungen über den ganzen Kern verteilt auf. Außerdem zeigen beide Kerne mehrere Klüfte mit unregelmäßigen Klufflächen.

Pfeilerbohrungen

In beiden Pfeilerbohrungen werden in Teufen über 1 m nur Permeabilitäten $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ festgestellt. Das ist in Abbildung 47 für die Bohrung RB 531 und in Abbildung 48 für RB 532 dargestellt.

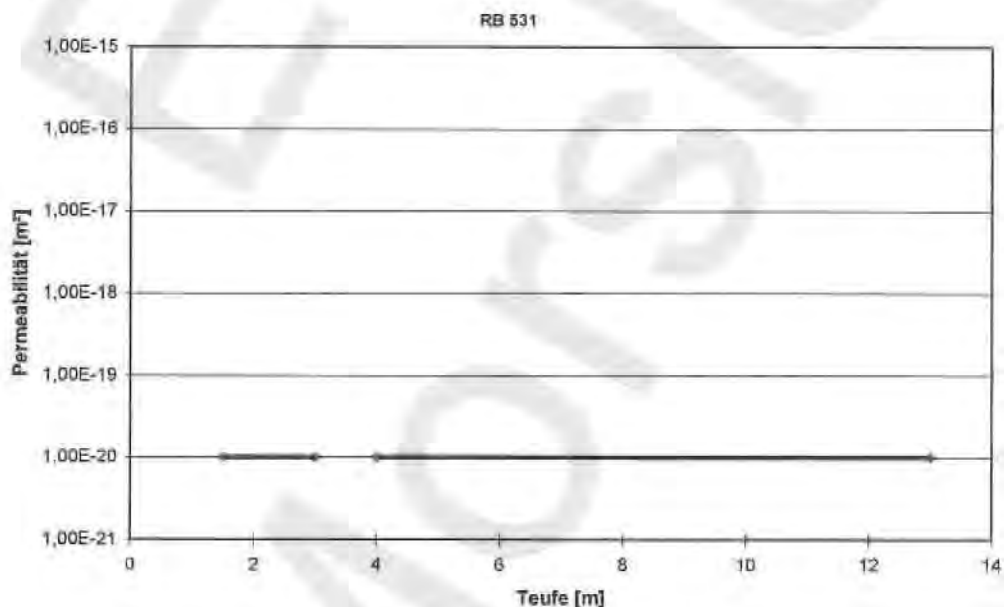


Abbildung 47: Permeabilitätsverlauf RB 531

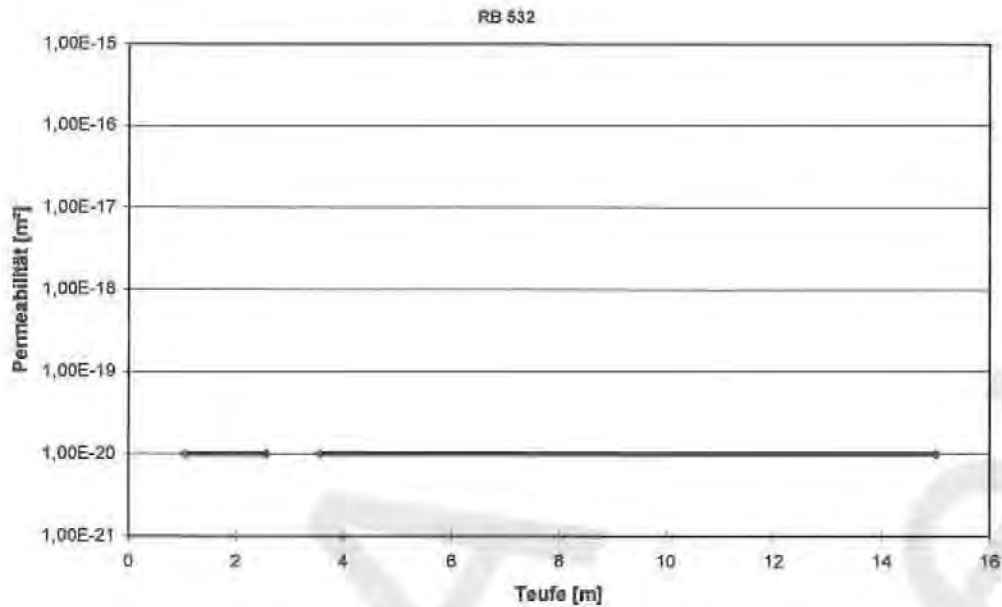


Abbildung 48: Permeabilitätsverlauf RB 532

In der folgenden Tabelle 11 sind die einzelnen Testergebnisse aufgeführt.

Tabelle 11: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in den Bohrungen RB 531 und RB 532

	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
Bohrung RB531	Steinsalz	1E -22	Pulstest	3	4	13	531101-2
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	1	1,5	3	531103-4
Bohrung RB532	Steinsalz	1E -22	Pulstest	6	3,56	15	532201-2
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	22	1,06	2,56	532203-5

Schwebenbohrungen

Wegen der geringen Teufe der Schwebenbohrungen konnten die Doppelpacker, die Bohrlöcher mit einer Teufe von mindestens 4,5 m benötigen, hier nicht eingesetzt werden. Statt dessen wurden die Messungen mit einem Schlauch-Einzelpacker (identisch mit den Komponenten des Doppelpackers) und einem Packer für Kurzbohrungen (s. Abschnitt 3.2.2) durchgeführt. Diese Packer verschließen den Bohrlochabschnitt zwischen Packer und Bohrlochtiefstem, wobei der abgepackte Bereich über eine Injektionsleitung zugänglich ist.

Nach den Erfahrungen in der Bohrung RB 522, in der die Rückförderung von Spülluft die ersten Tests gestört hatte, wurde in der Bohrung RB 534 zunächst kontrolliert, ob sie drucklos war. Die Bohrung RB 534 wurde am 11. Dezember 1996 fertiggestellt. Am selben Tag wurde ein Verschlußpacker eingebaut und über mehrere Tage die Druckentwicklung registriert. Es wurde keine Rückförderung festgestellt.

Im ersten Injektionstest an dieser Lokation wurde der Einfachpacker am Bohrlöchermund der Bohrung RB 534 gesetzt und einige Minuten ohne Ratenregelung direkt aus dem Kompressor injiziert. Entsprechend der Förderleistung des eingesetzten Kompressors wurden dabei ca. 100

dm³/min Luft in die Bohrung verpreßt. Trotz dieser großen Injektionsrate wurde kein Anstieg des Bohrlochdruckes festgestellt.

In den Tests 534NP02 und 533NP02 waren beide Bohrungen verschlossen, die Bohrung RB 533 mit dem Einzelpacker kurz unterhalb vom Bohrlochmund und die Bohrung RB 534 durch den Packer für Kurzbohrungen in 1,2 m Teufe. Wegen der unterschiedlichen Dichtlänge der beiden Packer war damit in beiden Bohrungen der Bohrlochabschnitt zwischen ca. 1,3 und 3,5 m verschlossen. Im Test 534NP02 wurde in die Bohrung RB 534 während zwei Tagen mit der Rate 2 dm³/min injiziert, im Test 533NP02 in die Bohrung RB 533 mit derselben Rate über einen Zeitraum von drei Tagen. In beiden Fällen wird weder in der Beobachtungsbohrung noch in der Injektionsbohrung eine Änderung des Druckes registriert.

In den beiden letzten Tests an dieser Lokation wurde in der Bohrung RB 533 der abgepackerte Bereich verkürzt, im Test 533NP03 auf 1 m und im Test 533NP04 auf 0,5 m. Auch die Injektion in diese kürzeren Bohrlochabschnitte mit jeweils 2 dm³/min über Nacht bewirkt keinen Druckanstieg. Es ist folglich nicht gelungen, in der Schweben neben den hochdurchlässigen Bereichen auch geringpermeable Bereiche nachzuweisen. Dennoch ist davon auszugehen, daß sich die Auflockerung in der Schweben nicht als Kontinuum ausbildet, sondern klüftige Bereiche im Wechsel mit geringdurchlässigen Salzlagen entstehen. Das läßt sich an den erbohrten Kernen ablesen, die neben den gebrochenen Bereichen auch sehr kompakte Abschnitte ohne erkennbare Wegsamkeiten aufweisen.

Die Tests in den Schwebenbohrungen sind in der folgenden Tabelle 12 aufgeführt. Bei diesen Tests wurde jeweils in beiden Bohrungen der Druck gemessen, in der Tabelle genannt ist jeweils die Injektionsbohrung.

Tabelle 12: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in den Bohrungen RB 533 und RB 534

	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
Bohrung RB533	Steinsalz	> 1E-15	CR-Test	< 1	0,36	3,5	533NP01
	Steinsalz	> 1E-15	CR-Test	3	1,2	3,5	533NP02
	Steinsalz	> 1E-15	CR-Test	1	2,5	3,5	533NP03
	Steinsalz	> 1E-15	CR-Test	3	3	3,5	533NP04
Bohrung RB534	Steinsalz		Druckbeobachtung	6	0,99	3,5	534NP01
	Steinsalz	> 1E-15	CR-Test	2	1,2	3,5	534NP02

4.1.1.5 Bohrungen RB 538, 539 und 540

Die Bohrungen RB 538, 539 und 540 wurden im Ostquerschlag auf der 2. Sohle zwischen den Lagerteilen D und E in das Ältere Steinsalz geteuft. Die Länge der Bohrungen beträgt jeweils 20 m, sie durchteufen ausschließlich z2HS. Die Bohrungen wurden mit bis zu 30 gon abwärts geneigt in Richtungen um 200 gon gebohrt. An dieser Lokation, die sich in großer Entfernung zu Abbaukammern befindet, sollte die Permeabilität des unverritzten Salzgesteins bestimmt werden.

Zusätzlich zu den in den folgenden Kapiteln 0 bis 0 vorgestellten eigenen Untersuchungen wurden von der Golder Associates GmbH Messungen an dieser Lokation durchgeführt. Golder führte die Tests mit ihrer eigenen Testgarnitur als Gaspulstests mit Laufzeiten um 300 h durch. Dabei wurde in den Bohrungen RB 538, 539 und 540 die Permeabilität des ungestörten Steinsalzes zu $\leq 10^{-20}$ m² bestimmt.

Die Kerne aus den Bohrungen RB 538, 539 und 540 weisen einzelne kleine Risse auf, ohne daß offener Porenraum erkennbar ist. Das erbohrte Steinsalz zeigt geringe Anhydritanteile in Form einzelner Flocken oder Fetzen.

Bohrung RB 538

Das Ziel der Tests in den Bohrungen RB 538, 539 und 540 war der Nachweis einer Permeabilität kleiner 10^{-20} m^2 für Steinsalz im unverritzten Zustand. Dieser Nachweis wurde für die Bohrung RB 538 in den Tests 538205/8, 538209/10 und 538211/12 erbracht. In der folgenden Tabelle 13 sind die in der Bohrung RB 538 durchgeführten Tests zusammengestellt.

Tabelle 13: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 538

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB538	Steinsalz	> 1E -20	Pulstest	< 1	3,6	20	538201
	Steinsalz	2E -20	Pulstest	4	1,1	2,6	538203-4
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	7	10	11,5	538205-8
	Steinsalz	1E -22	Pulstest	7	12,5	20	538205-8
	Steinsalz	2E -20	Pulstest	7	7	8,5	538209-10
	Steinsalz	1E -22	Pulstest	7	9,5	20	538211-12

Neben den undurchlässigen Bohrlochabschnitten traten in den Intervallen 1,1 - 2,6 m und 7 - 8,5 m Permeabilitäten über 10^{-20} m^2 auf. Als Ursache dafür ist ein östlich der Lokation rechtwinklig vom Hauptquerschlag nach Süden abzweigendes kurzes Streckenstück mit geringem Querschnitt (ca. 2 m²) anzusehen. Da die Bohrung RB 538 aus technischen Gründen nicht senkrecht zum Stoß gebohrt werden konnte, reicht sie teilweise bis auf wenige Meter an dieses Streckenstück heran. Folglich wird hier das Steinsalz nicht im unverritzten Zustand angetroffen.

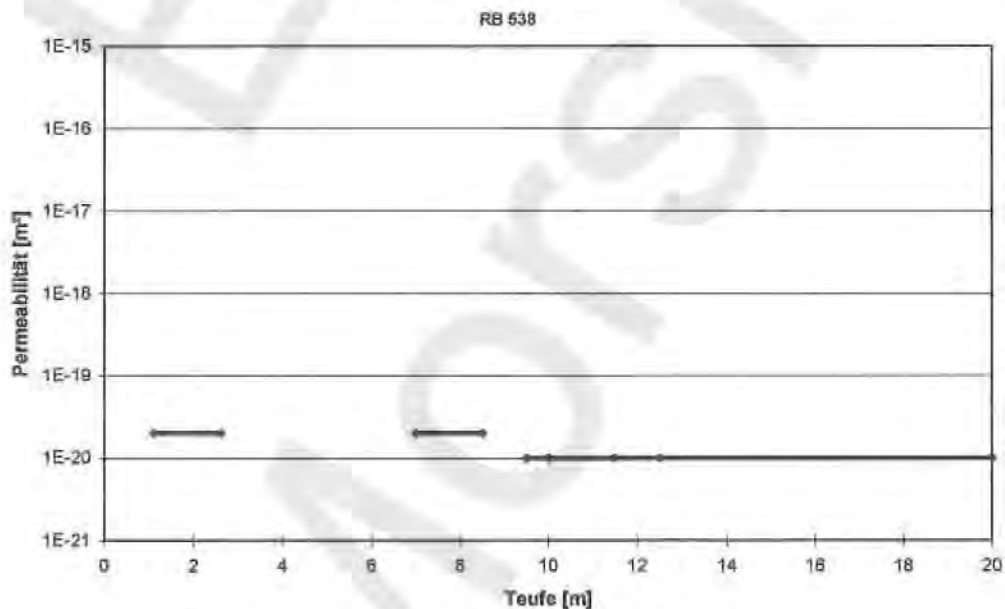


Abbildung 49: Permeabilitätsverlauf in der Bohrung RB 538

Bohrung RB 539

Die in der Bohrung RB 539 durchgeführten Tests sind in der folgenden Tabelle 14 zusammengestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 539

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB539	Steinsalz	2E -20	Pulstest	6	1,1	2,6	539101-2
	Steinsalz	1E -20	Pulstest	8	1,1	2,6	539103-5
	Steinsalz	1E -23	Pulstest	8	3,6	20,02	539103-5

Aus dem Test 539101/2 im Intervall 1,1 - 2,6 m wurde die Permeabilität zu $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt. Im gleichen Intervall wurde der Test 539103/5 durchgeführt, er bestätigt mit $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ ungefähr dieses Ergebnis. Aus dem Unterschied zwischen den beiden Ergebnissen und aus der Tatsache, daß in beiden Tests die Ableitung der gemessenen Druckverläufe nach dem Logarithmus der Zeit kleiner ist als bei den theoretischen Druckverläufen, läßt sich folgern, daß die Abdichtung des Packers gegen die Bohrlochwand im ersten Test weniger gut war als im zweiten Test. Die kleinere der beiden Permeabilitätsangaben ist daher als Gebirgsdurchlässigkeit anzusetzen. Es ergibt sich der in Abbildung 50 dargestellte Permeabilitätsverlauf.

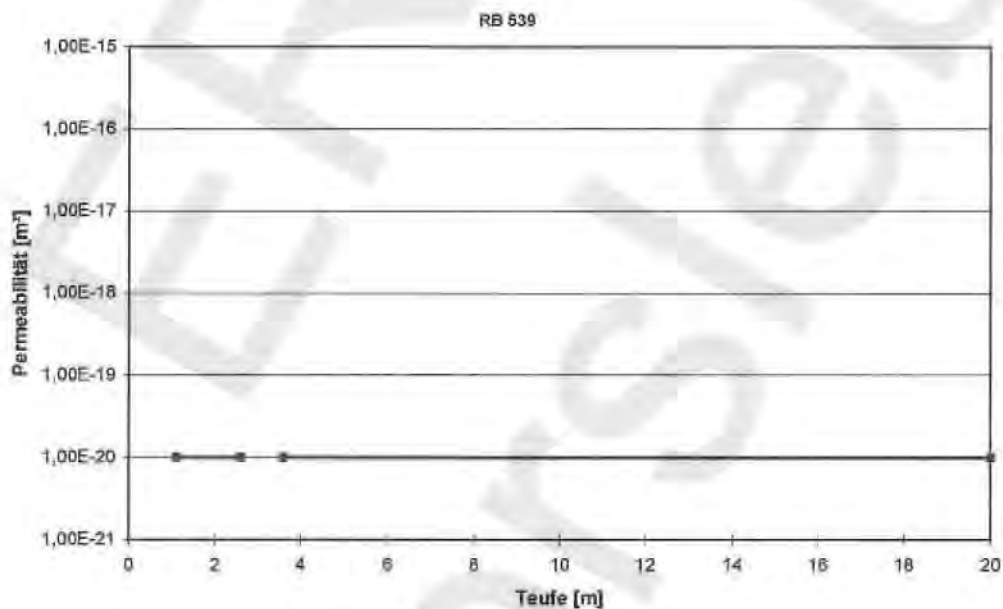


Abbildung 50: Permeabilitätsverlauf in der Bohrung RB 539

Bohrung RB 540

In der Bohrung RB 540 wurden zunächst zwei Tests mit einem Reserve-Doppelpacker durchgeführt. Dieser Doppelpacker besitzt keine Drucksensoren im Testintervall. Verglichen mit den beiden anderen Testausrüstungen weist dieser Packer einen stärkeren Anfangseffekt auf, da der als Druck im Bohrloch tiefsten angegebene Druck tatsächlich am Bohrlochmund gemessen wird und somit den Druckabfall in der Injektionsleitung beinhaltet. Bei der Auswertung wird daher nur der Druckverlauf nach dem Abklingen des Anfangseffektes berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Testausrüstungen lagen für den Reserve-Doppelpacker nicht genügend Eichversuche vor, um Leckraten zur Korrektur gemessener Druckverläufe pauschal anzugeben. Statt dessen müssen hier die Packerverluste komplett dem jeweils auszuwertenden Bohrlochabschnitt zugeschlagen werden, bei identischen Packerleckraten wird folglich mit dem Reservepacker eine höhere Gebirgsdurchlässigkeit ausgewiesen als mit dem Standard-Doppelpackern.

Im Test 540301/2 wurden das Intervall 1,6 - 2,6 m und das Bohrlochtiefste zeitgleich getestet. Während der achttägigen Testdauer wurde im Bohrlochtiefsten nur ein geringer Druckabfall gemessen. Aus dem ebenfalls geringen Abfall des Packerdruckes läßt sich die Verlustrate mit ca. $10 \text{ cm}_e^3/\text{h}$ abschätzen. Mit Berücksichtigung der Packerleckage ergibt sich eine Permeabilität zwischen 10^{-21} und 10^{-22} m^2 . Die mit über 10^{-19} m^2 hohe Permeabilität im Intervall ist den zu großen Korrekturwerten für den Reserve-Doppelpacker zuzurechnen. Der Test 540303/5 wurde in gleicher Weise wie der vorangegangene Versuch ausgeführt, jedoch mit um 1 m tiefer gesetztem Doppelpacker. Wie im Vorversuch wird im Bohrlochtiefsten eine Permeabilität um 10^{-22} m^2 und im Intervall um 10^{-19} m^2 ermittelt. Daß die wirkliche Permeabilität auch in geringer Teufe wesentlich kleiner ist als in den Tests 540301/2 und 540303/5 ermittelt, konnte im Test 540101/2 mit der Testausrüstung 1 gezeigt werden. Der Druckverlauf im Bohrlochtiefsten unterhalb 3,6 m bestätigt die Permeabilität 10^{-22} m^2 . Im Gegensatz zu den Versuchen mit dem Reserve-Doppelpacker wird hier eine Permeabilität für das Intervall von deutlich unter 10^{-20} m^2 festgestellt.

Die in der Bohrung RB 540 durchgeführten Tests sind in der folgenden Tabelle 15 zusammengestellt.

Tabelle 15: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 540

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB540	Steinsalz	2E -19	Pulstest	8	1,6	2,6	540301-2
	Steinsalz	1E -21	Pulstest	8	4,1	20,17	540301-2
	Steinsalz	1E -19	Pulstest	6	2,6	3,6	540303-5
	Steinsalz	1E -22	Pulstest	6	5,1	20,17	540303-5
	Steinsalz	1E -22	Pulstest	3	1,1	2,6	540101-2
	Steinsalz	5E -21	Pulstest	3	3,6	20,17	540101-2

Der Permeabilitätsverlauf ist in Abbildung 51 dargestellt.

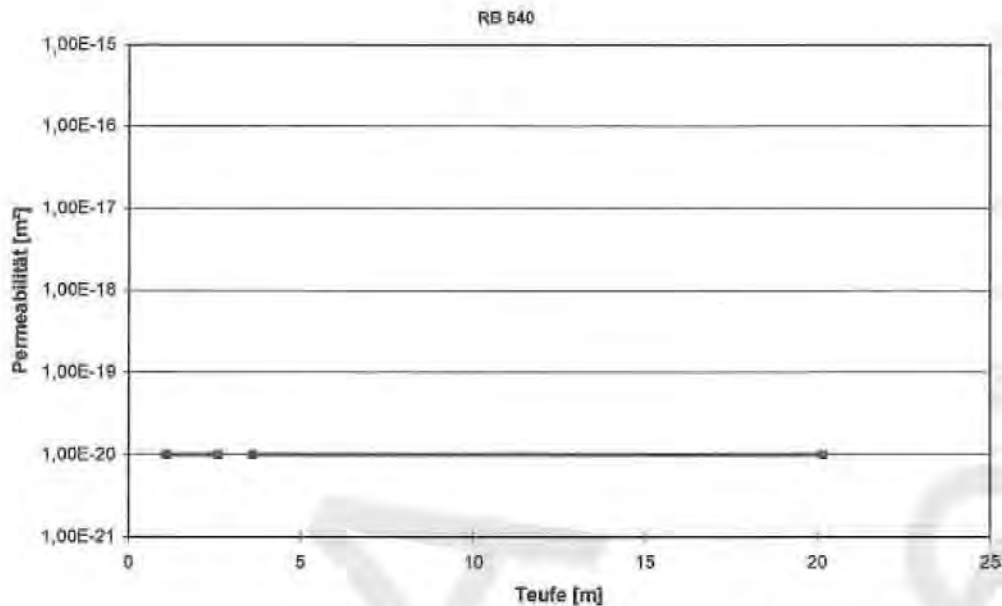


Abbildung 51: Permeabilitätsverlauf in der Bohrung RB 540

4.1.1.6 Bohrungen RB 541 und 542

Die Bohrungen RB 541 und 542 wurden von der 2. Sohle aus im Abbau 3N in die Firste nahe des nördlichen Stoßes geteuft. Die Bohrung RB 542 verläuft fast vertikal und endet auf der 1. Sohle im Liegenden des Abbaus 2N direkt am nördlichen Stoß. In diesem Bereich überlappt der Abbau 2N der 1. Sohle den Abbau 3N der 2. Sohle. In die Schweben zwischen diesen beiden Abbauen reicht außerdem der Abbau 2N der 2a Sohle, an den die Bohrung RB 542 auf wenige Meter heranreicht. Aufgrund dieser Schwebensituation ist der von der Bohrung RB 542 durchörtete Gebirgsbereich wesentlich stärker durch die mechanischen Auswirkungen der Abbaukammern beeinflusst als die Bohrung RB 541, die keine Schweben durchquert. Die Bohrung RB 541 verläuft von der 2. Sohle aus in nordwestlicher Richtung und endet auf der 1. Sohle in der Nordstrecke wenige Meter nördlich des Aufgangs zu Abbau 1a.

Die Bohrungen setzen im Anhydritmittelsalz (z3AM) an und erreichen bei 16,61 m bzw. 11,64 m das Bank-, Bändersalz (z3BK/BD). Ihre Länge beträgt 56,45 m bzw. 33,85 m. Der in RB 541 erbohrte Kern weist am Ende Klüfte im Salz mit unregelmäßigen Kluftflächen auf. In der Bohrung RB 542 treten solche Klüfte zwischen 2 m und 6,20 m auf. Die Kerne aus beiden Bohrungen werden in den grobkristallinen Bereichen von Kristallspaltflächen durchschlagen. Die Bruchflächen sind hier glatt und passen exakt zusammen. Außerdem sind an beiden Kernen kleine unregelmäßige Entlastungsrisse zu erkennen. Die Bohrung RB 541 verläuft in Teufen über 4 m ausschließlich im Steinsalz. Die Bohrung RB 542 durchörtet in den Teufen 1,7 m, 4,6 m und 8 m Anhydritlagen von einigen cm Mächtigkeit.

Bohrung RB 541

Um in dieser Bohrung einen Test über die gesamte Länge durchzuführen, mußte sie durch zwei unabhängige Packer an den Enden verschlossen werden. Dazu wurden Doppelpacker von der 1. Sohle und der 2. Sohle aus gesetzt.

Daten zu der durchgeführten Messung sind in der folgenden Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Bohrlochtest in der Bohrung RB 541

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB541	Steinsalz	5E - 22	Pulstest	13	5	51,85	541202-3

Der im Test 541202/3 während zwei Wochen gemessene Druck fällt vom Anfangswert nur um ca. 40 hPa ab, daraus wird ein Permeabilitätswert deutlich unter 10^{-20} m² ermittelt.

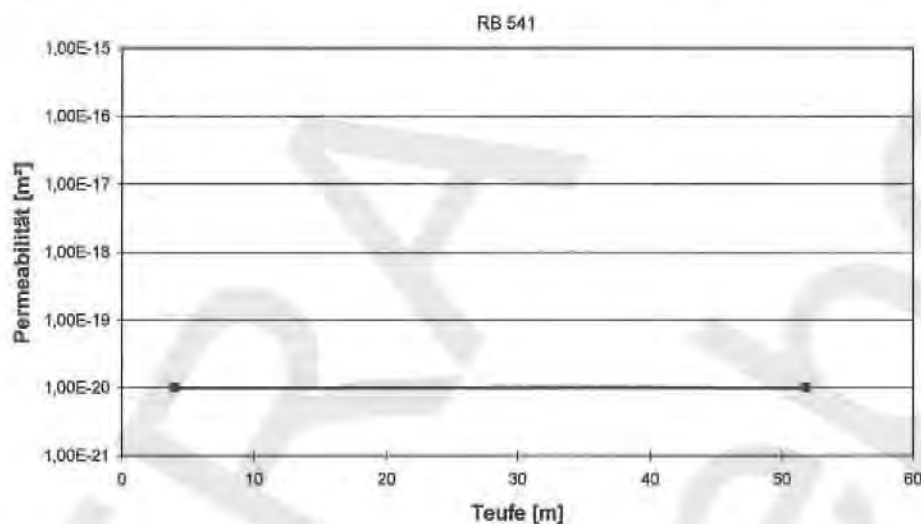


Abbildung 52: Permeabilitätsverlauf RB 541

Bohrung RB 542

In der Bohrung RB 542 wurden zunächst mehrere Tests über lange Bohrlochabschnitte durchgeführt, in denen durchlässige Bereiche erkannt wurden. Die Testintervalle wurden dann jeweils verkürzt, bis im Test 542S10/12 im Bohrlochabschnitt 11,75 - 29,85 m eine Permeabilität unter 10^{-20} m² nachgewiesen wurde. Die durchgeführten Test sind in der folgenden Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Bohrlochtests in der Bohrung RB 542

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB542	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -20	Pulstest	<1	2,05	29,85	542s01
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -20	Pulstest	1	2,05	29,85	542s02-3
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -20	Pulstest	4	5,85	29,85	542s04-5
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -20	Pulstest	7	5,85	29,85	542s06-7
	Steinsalz	8E -21	Pulstest	22	11,75	29,85	542s10-12
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -15	Pulstest	< 1	1	2,5	542113
	Steinsalz	1E - 17	Pulstest	3	2,5	4	542114-15

Fortsetzung Tabelle 17: Bohrlochtests in der Bohrung RB 542

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB542	Steinsalz/Anhydrit	2E - 18	Pulstest	2	3,5	5	542116-17
	Steinsalz/Anhydrit	4E - 15	Intervall	< 1	4,5	6	542118
	Steinsalz	6E - 15	Intervall	< 1	5,5	7	542119
	Steinsalz	1E - 19	Pulstest	4	6,5	8	542120-21
	Steinsalz/Anhydrit	8E - 20	Pulstest	1	7,5	9	542122-23
	Steinsalz	1E - 19	Pulstest	1	8,5	10	542124-25
	Steinsalz	5E - 20	Pulstest	5	9,5	11	542126-27
	Steinsalz	5E - 20	Pulstest	1	10,5	12	542128-29
	Steinsalz	5E - 20	Pulstest	2	11,5	13	542130-31
	Steinsalz/Anhydrit	> 1E -20	CR-Test	5	4,5	6	542132-36
	Steinsalz	> 1E -20	CR-Test	10	5,5	7	542137-40

Insgesamt wurde der in Abbildung 53 dargestellte Permeabilitätsverlauf längs des Bohrlochs ermittelt.

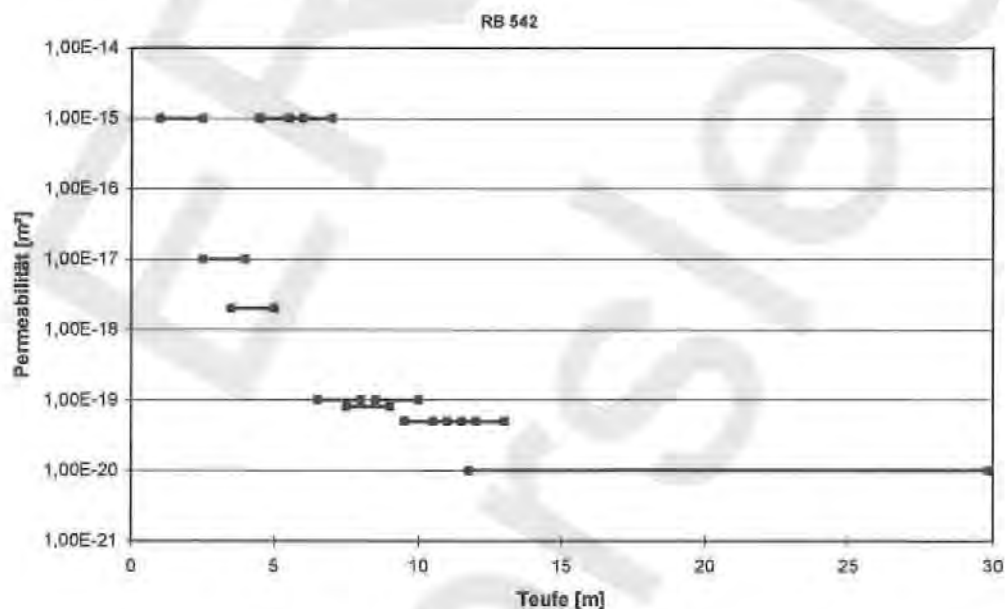


Abbildung 53: Permeabilitätsverlauf RB 542

In dem hochdurchlässigen Bereich zwischen 4,5 und 7 m wurden zusätzlich zu den Pulstests zwei Constant Rate Tests durchgeführt. Im Test 542132/36 wurde mit 0,3 dm³/min in das Intervall 4,5 - 6 m über Nacht injiziert. Der Diagnoseplot der Injektionsphase scheint wegen des kontinuierlichen Anstiegs der Derivative-Kurve auf eine Begrenzung des permeablen Bereichs hinzudeuten. Allerdings zeigt der Test 542137/40, bei dem über mehrere Tage mit 0,5 dm³/min in das Intervall 5,5 - 7 m injiziert wurde, daß die Steigung des Derivative-Verlaufs später wieder negativ wird. Eine Begrenzung des permeablen Bereichs liegt also nicht vor, vielmehr werden während der Injektion durch die sich ausbreitende Druckfront Bereiche mit wechselnden Permeabilitäten erfaßt.

4.1.1.7 Bohrungen RB 543, 544, 545 und 546

Die Bohrungen RB 543, 544, 545 und 546 wurden erstellt, um die hydraulischen Eigenschaften des Anhydrits, der in anderen Bohrungen bereichsweise permeabel angetroffen wurde, weiter zu untersuchen. Insbesondere sollte die räumliche Erstreckung der permeablen Bereiche bestimmt werden.

Die Bohrungen RB 543 und 544 setzen im Hauptanhydrit z3HA an und verlaufen bis zur Endteufe von 40 m im Hauptanhydrit. Klüfte treten mit Abständen im Meterbereich mit unterschiedlichen Orientierungen auf. Sie können in situ offenen Porenraum beinhalten. Besonders intensive Klüftung weisen beide Bohrungen im Bereich um ca. 15 - 20 m auf. In diesen sowie in einigen Bereichen in größerer Teufe waren die erbohrten Kerne feucht.

Die Bohrung RB 545 setzt im Liniensalz z3LS an und erreicht bei 23,1 m den Hauptanhydrit z3HA. Im Steinsalz wurden eine offene Kluft in ca. 4 m Teufe und wenige Risse in geringeren Teufen erbohrt. Im Anhydrit wurden wenige Klüfte, die als in situ offen eingestuft werden, angetroffen, ausschließlich im Bereich oberhalb 35 m. Klüfte mit Mineralneubildungen treten nur unterhalb 33 m auf. Die Anhydritkerne waren überwiegend feucht. Die Bohrung RB 546 verläuft vollständig im Steinsalz.

Bohrung RB 543

In der Bohrung RB 543 wurden zunächst Intervalltests in den Bohrlochabschnitten durchgeführt, in denen die Klüftigkeit der Kerne auf Wegsamkeiten hinwies. Dabei wurden unterschiedliche Permeabilitäten zwischen 10^{-20} m^2 und 10^{-15} m^2 ermittelt. Bei den Intervalltests im Teufenbereich 14,5 bis 21,5 m wurden Druckanstiege im Bohrloch tiefsten verzeichnet, das Gebirge ist hier bohrlochparallel wegsam.

Die in der Bohrung RB 543 durchgeführten Test sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 543

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
RB543	Anhydrit	5E - 20	Pulstest	1	10,7	12,2	543101-02
	Anhydrit	5E - 20	Pulstest	6	3,53	5,03	543103-05
	Anhydrit	2E - 18	Pulstest	1	36,2	37,7	543106-07
	Anhydrit	1E - 18	Pulstest	1	20	21,5	543108-09
	Anhydrit	2E - 17	Pulstest	1	18,5	20	543110
	Anhydrit	1E - 16	Pulstest	1	17	18,5	543111
	Anhydrit	2E - 20	Pulstest	3	3,53	5,03	543112-13
	Anhydrit	2E - 20	Pulstest	1	37,7	40	543114-15
	Anhydrit	1E - 16	Pulstest	1	16	17,5	543116-17
	Anhydrit	2E - 19	Pulstest	1	14	15,5	543118-19
	Anhydrit	1E - 19	CR-Test	4	13	14,5	543120-21
	Anhydrit	2E - 15	CR-Test	7	17	18,5	543122-23
	Anhydrit	Beobachtung der Injektion in RB 544		18	3,53	5,03	543124-25

Die in der Abbildung 54 dargestellten Permeabilitäten wurden gemessen.

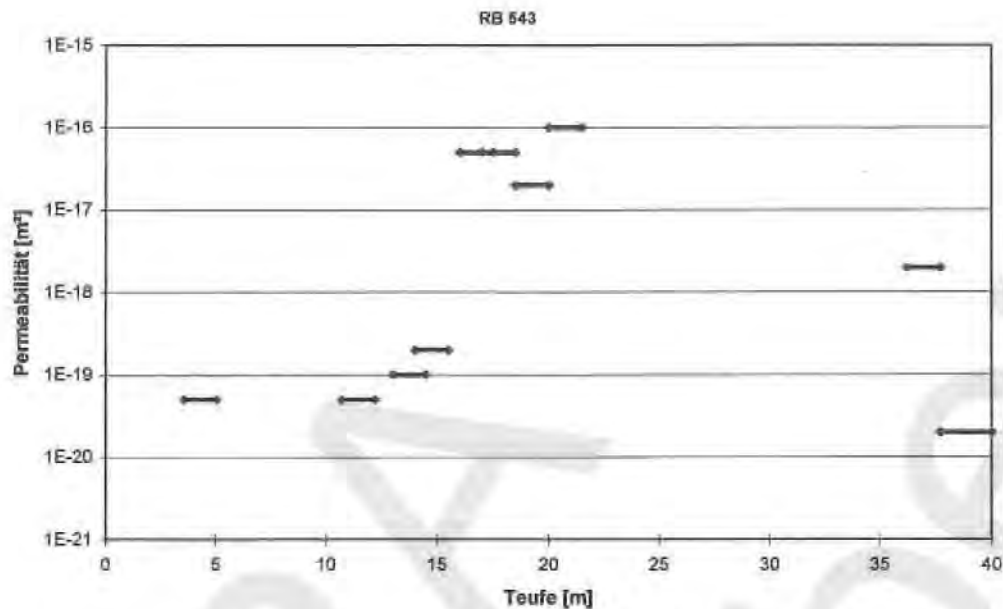


Abbildung 54: Permeabilitätsverlauf RB 543

Im Intervall 15 - 16,5 m wurde der Test 543122-3 als Constant Rate Test durchgeführt. Dabei wurden während einer siebentägigen Injektionsphase über 3 m³ Gas in das Gebirge verpresst. Eine Begrenzung des permeablen Bereichs läßt sich im Druckverlauf nicht erkennen. Zeitgleich mit dem Test 543122-3 wurde in der benachbarten Bohrung RB 544 der Druck gemessen (Test 544201-3). Dabei sperrte dort der Doppelpacker das Intervall 15,5 bis 17 m ab. Die Injektion in das Intervall der Bohrung RB 543 im Test 543122-3 bewirkte sowohl im Bohrlochtiefsten der Bohrung RB 543 wie auch im Bohrlochtiefsten der Bohrung RB 544 einen Druckanstieg. Die beiden Druckverläufe sind in Abbildung 55 zusammen dargestellt.

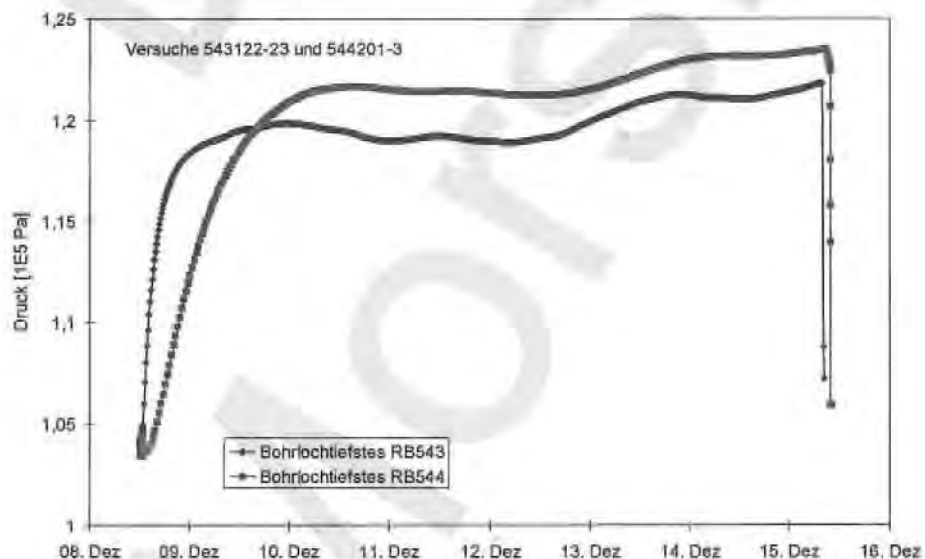


Abbildung 55: Vergleich der Druckverläufe im Bohrlochtiefsten der Bohrungen RB 543 und RB 544

Der Druck steigt in der Bohrung RB 544 stärker an als in der Bohrung RB 543. Die Permeabilität des Gebirges ist folglich senkrecht zu den Bohrlöchern wesentlich größer als bohrlochparallel.

Bohrung RB 544

In der Bohrung RB 544 wurden die in der Tabelle 19 aufgeführten Tests durchgeführt. Erhöhte Durchlässigkeiten zwischen 10^{-19} m^2 und 10^{-15} m^2 wurden in Teufen zwischen 15,5 und 21,5 m gefunden. In drei Testabschnitten unterhalb 25 m, für die aufgrund der an den Kernen festgestellten Klüfte Wegsamkeiten vermutet wurden, lagen keine Durchlässigkeiten $> 10^{-20} \text{ m}^2$ vor. Die gemessenen Permeabilitäten sind teufenabhängig in Abbildung 56 eingezeichnet.

Tabelle 19: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 544

Bohrung RB544	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
	Anhydrit	Beobachtung der Injektion in RB 543		7	17	40	544201-3
	Anhydrit	5E - 21	Pulstest	1	35,5	37	544204-5
	Anhydrit	5E - 21	Pulstest	1	31,3	32,8	544206-7
	Anhydrit	5E - 21	Pulstest	1	25	26,5	544208-9
	Anhydrit	1E - 16	Pulstest	<1	20	21,5	544210
	Anhydrit	5E - 17	Pulstest	4	18,5	20	544211-12
	Anhydrit	1E - 17	Pulstest	17	17	18,5	544213-14
	Anhydrit	2E - 19	Pulstest	1	15,5	17	544215-16

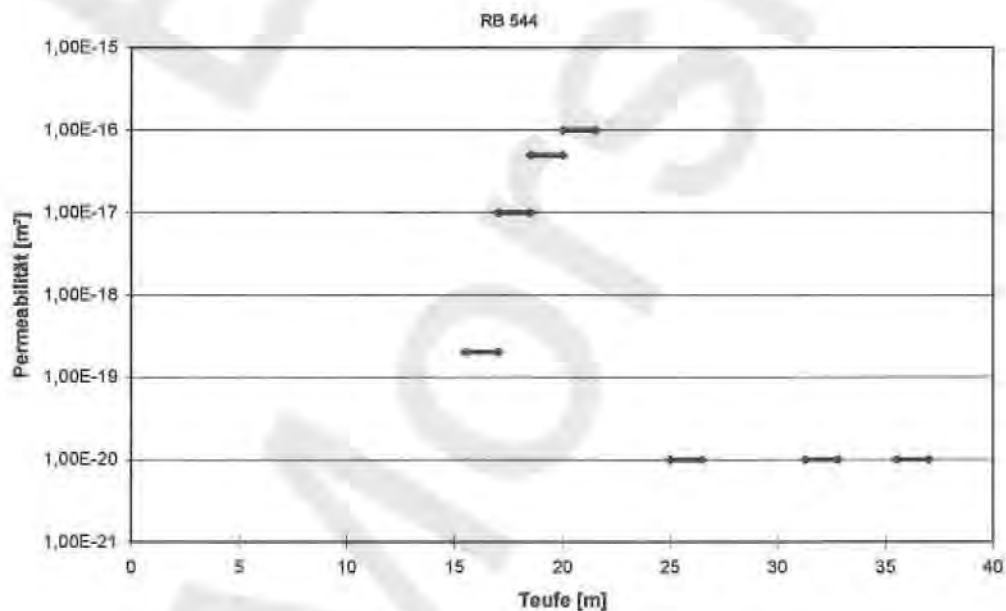


Abbildung 56: Permeabilitätsverlauf RB 544

Bohrungen RB 545 und 546

Die Doppelpacker wurden nach jedem Transport innerhalb des Grubengebäudes überprüft. Dazu wurde der Doppelpacker in einem Stahlrohr gesetzt und das Intervall mit Druck beaufschlagt. Vor den Tests in der Bohrung RB 545 hatte dieser Prüfvorversuch ergeben, daß eine Undichtigkeit am Doppelpacker aufgetreten war. Dadurch konnten Permeabilitäten < 2 bis $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ nicht mehr bestimmt werden, die Eignung zur Messung größerer Permeabilitäten war dadurch nicht beeinträchtigt. Die Aufstellung der durchgeführten Tests in der folgenden Tabelle 20 zeigt, daß die Bohrung RB 545 keine hochdurchlässigen Bereiche im Anhydrit durchörtert.

Tabelle 20: Ergebnisse aus den Bohrlochtests in der Bohrung RB 545

Bohrung RB545	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
	Steinsalz/Anhydrit	$> 1\text{E} - 15$	CR-Test	6	3,62	39,72	545101-2
	Anhydrit	$5\text{E} - 20$	Pulstest	< 1	38,6	39,72	545103-4
	Anhydrit	$2\text{E} - 20$	Pulstest	1	35,5	37	545105-6
	Anhydrit	$2\text{E} - 20$	Pulstest	1	34	35,5	545107-8
	Anhydrit	$2\text{E} - 20$	Pulstest	3	32,5	34	545109-10
	Anhydrit	$5\text{E} - 20$	Pulstest	1	31	32,5	545111-12
	Anhydrit	$5\text{E} - 20$	Pulstest	1	27,5	29	545113-14
	Anhydrit	$5\text{E} - 20$	Pulstest	1	26	27,5	545115-16
	Anhydrit	$2\text{E} - 20$	Pulstest	1	22,5	24	545117-18
	Anhydrit	$5\text{E} - 20$	Pulstest	1	23,5	25	545119
	Steinsalz	Druckbeobachtung		3	23	39,72	545120-21
	Anhydrit	$2\text{E} - 21$	Pulstest	10	23	39,72	545122-24

Abschließend wurde der Test 545122-24 im Bohrlochtieftsten zwischen 23 und 39,72 m durchgeführt. Wegen der größeren Bohrlochlänge wirkt sich hier die Undichtigkeit des Doppelpackers weniger stark auf das Testergebnis aus. In diesem Test wurde als integrale Permeabilität für den Anhydrit $< 10^{-20} \text{ m}^2$ nachgewiesen.

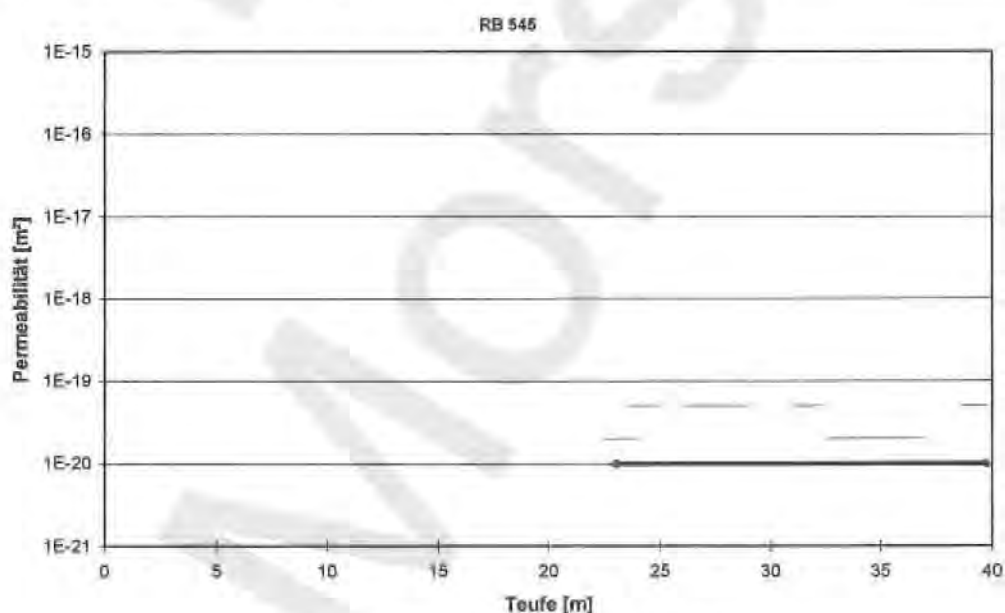


Abbildung 57: Permeabilitätsverlauf RB 545

Im Test 545101-2 wurden in das Bohrlochtiefe zwischen 3,62 und 39,72 m fast 40 m³ Gas injiziert. In diesem Abschnitt ist die am erbohrten Kern im Salz festgestellt Kluft enthalten. Zunächst wurde für 24 Stunden mit der Rate 1 dm³/min, anschließend für 5 Tage mit 5 dm³/min verpreßt. Die dadurch erzielte Druckänderung im Bohrloch war marginal.

Bohrung RB 546

Durch Kontrollmessungen in der Bohrung RB 546 während Injektionen in RB 545 sollte festgestellt werden, ob sich Wegsamkeitsnetze im Anhydrit bis in das umgebende Steinsalz erstrecken. In den Kontrollmessungen wurde sowohl das Intervall zwischen den beiden Packern als auch das darunter liegende Intervall bis zum Bohrlochtiefe überwacht. Da von der Bohrung RB 545 keine permeablen Anhydritbereiche aufgeschlossen wurden, wurde folgerichtig während einer Injektion in den Anhydrit der Bohrung RB 545 keine Druckänderung in der Bohrung RB 546 festgestellt. Auch durch den Test 545101-2, in dem fast 40 m³ Gas in die Bohrung RB 545 injiziert wurden, wurde der Druck in der Bohrung RB 546 nicht beeinflusst.

Tabelle 21: Bohrlochtests in der Bohrung RB 546

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervall 1 [m]	Intervall 2 [m]	Testname
RB546	Steinsalz	Beobachtung der Injektion in RB 545		6	2,88 - 4,38	5,38 - 40	546201-2
	Steinsalz	dito		1	2,88 - 4,38	5,38 - 40	546203
	Steinsalz	dito		3	2,88 - 4,38	5,38 - 40	546204-5

4.1.1.8 Bohrungen RB 509, 510, 511 und 512

Vor Beginn der Untersuchungen im Arbeitspaket 9M 2131003100 waren Tests mit einer anderen Testausrüstung begonnen worden. Diese Tests wurden in den Bohrungen RB 509 - 512 durchgeführt. Die Testergebnisse aus diesen Bohrungen stimmen mit den übrigen Resultaten überein. Die Tests sind in der folgenden Tabelle 22 zusammengestellt.

Tabelle 22: Bohrlochtests in den Bohrungen RB 509, 510, 511 und 512

	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Testdauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Testname
Bohrung RB509	Anhydrit	5E -20	Pulstest	1	6	20,07	FL509A
	Anhydrit	5E -20	Pulstest	1	11	20,07	FL509B
Bohrung RB510	Steinsalz/Anhydrit	1E -18	Pulstest	3	2	4	FL510
	Steinsalz/Anhydrit	<1E -20	Pulstest	3	5,5	24,75	FL510
Bohrung RB511	Steinsalz/Anhydrit	1E -20	Pulstest	9	5,5	15,07	FL511A
	Steinsalz/Anhydrit	1E -18	Pulstest	29	2	4	FL511B
	Steinsalz/Anhydrit	2E -20	Pulstest	29	5,5	15,07	FL511B
Bohrung RB512	Steinsalz	Druckbeobachtung		6	2	4	FL512
	Steinsalz	2E -21	Pulstest	6	5,5	11	FL512

Die Bohrung RB 509 wurde südlich der Hauptmulde von der Südost-Richtstrecke aus 20,2 m in den Hauptanhydrit geteuft. Der erbohrte Kern weist vereinzelt Risse auf. In dieser Bohrung wurden zwei Pulstests im Bohrlochtiefsten unterhalb 6 m bzw. 11 m durchgeführt. In den Tests wurden Permeabilitäten um $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt.

Die Bohrungen RB 510, 511 und 512 wurden auf der 4. Sohle im Südostfeld nahe des Rollochsystems 24 geteuft. Sie durchhörten vor allem Steinsalzschieben und vereinzelt Anhydritlagen.

In der Bohrung RB 510 wurde ein dreitägiger Test durchgeführt, in dem sowohl das Intervall 2 - 4 m als auch das Bohrlochtiefste 5,5 - 24,7 m mit Druck beaufschlagt waren. Aus den Druckverläufen wird ohne Korrektur von Packerverlusten die Permeabilität $5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ für das Intervall und $< 10^{-20} \text{ m}^2$ für das Bohrlochtiefste abgeleitet. Da mit dem in den Bohrungen RB 509 - 512 eingesetzten Doppelpacker keine Versuche zur Quantifizierung der Leakage-Raten durchgeführt wurden, muß für eine Korrektur der im Intervall und Bohrlochtiefsten gemessenen Druckverläufe der jeweils ungünstigste Fall unterstellt werden, nämlich daß der gesamte Gasverlust aus dem Packer in das Intervall bzw. in das Bohrlochtiefste strömt. Im Versuch FL510 ergibt sich für das Bohrlochtiefste keine Änderung des Ergebnisses, wenn der sich aus dem Verlauf des Packerdruckes ergebende Gasabstrom vollständig dem Bohrlochtiefsten zugerechnet wird. Wenn der gesamte Gasverlust aus dem Packer dem Intervall zugerechnet wird, ergibt sich aus dem korrigierten Druckverlauf mit $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ eine etwas größere Permeabilität.

In der Bohrung RB 511 wurden Tests im Intervall 2 - 4 m und im Bohrlochtiefsten 5,5 - 15,07 m durchgeführt. Während des ersten Tests über 9 Tage stieg der Druck im Bohrlochtiefsten um ca.

20 hPa an. Nach Korrektur um den gesamten Packerverlust ergibt sich daraus eine Permeabilität unter 10^{-20} m^2 . In einem weiteren Testabschnitt über einen Monat wird im gleichen Bohrlochabschnitt aus dem korrigierten Druckverlauf die Permeabilität 1 bis $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt. Es ist jedoch davon auszugehen, daß sich hier eine Permeabilität über 10^{-20} m^2 aufgrund technischer Ursachen ergibt, weil bei der Korrektur des gemessenen Druckverlaufes ein im Vergleich zur vorangegangenen Testphase um 50 % größerer Gaszufluß aus dem Packer unterstellt werden mußte. Für das Intervall 2 - 4 m wird die Permeabilität $0,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ bzw. $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ für den gemessenen bzw. korrigierten Druckverlauf festgestellt.

In der Bohrung RB 512 wurde ein Test im Bohrlochtiefsten zwischen 5,5 und 11 m durchgeführt, bei dem das Intervall 2 - 4 m als Kontrollzone diente. Dabei wurde mit Berücksichtigung der Packerverluste eine Permeabilität unter 10^{-20} m^2 für das Bohrlochtiefste nachgewiesen.

4.1.1.9 Tests im Ostfeld

In einer Serie von Bohrlochtests wurde der Anhydrit im Ostfeld untersucht. Die Lage der Bohrungen ist in der folgenden Abbildung 58 als Projektion auf die 4. Sohle dargestellt.

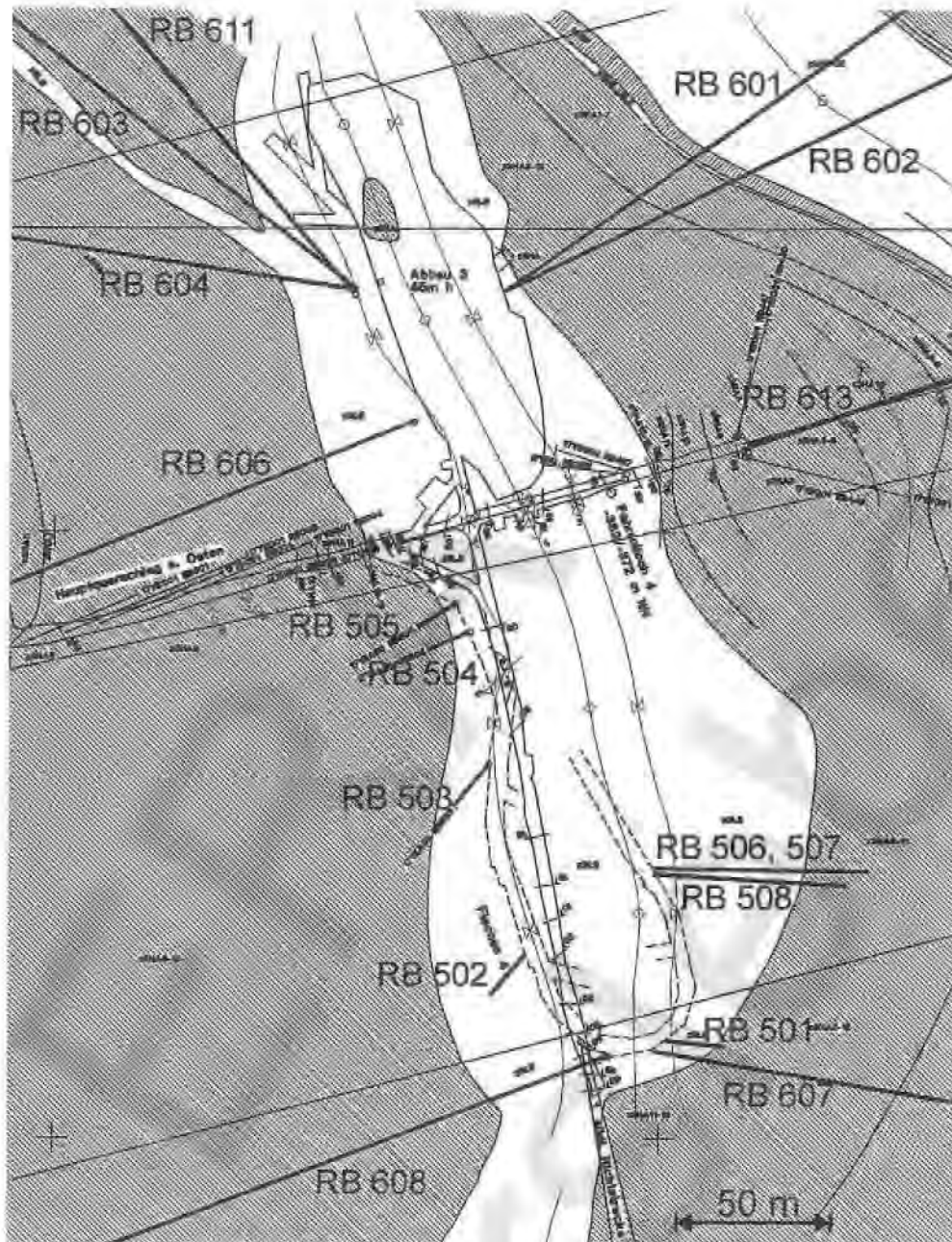


Abbildung 58: 4. Sohle, Lage der Bohrungen im Ostfeld

Die Ergebnisse dieser Tests sind in Tabelle 23 zusammengestellt.

Für einige Tests sind in der Tabelle 23 die Durchlässigkeiten als Transmissibilität im m^2 angegeben. Die äquivalenten Permeabilitäten ergeben sich durch Quotientenbildung mit den ebenfalls angegebenen Längen der Testabschnitte.

Tabelle 23: Bohrlochtests im Ostfeld

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Dauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Datum
RB501	Steinsalz/Anhydrit	2E -17	Pulstest	<1	1.0	8.0	29.04.1993
RB502	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	1,5	15.5	02.06.1993
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	1,5	2.5	04.06.1993
	Steinsalz	3E -17	Pulstest	<1	4,5	5.5	04.06.1993
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	9.5	10.5	07.06.1993
RB503	Steinsalz/Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	1.5	2.5	08.06.1993
	Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	4.5	5.5	08.06.1993
	Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	9.5	10.5	08.06.1993
	Steinsalz/Anhydrit	1E -18	Pulstest	<1	1.5	15.0	09.06.1993
RB504	Steinsalz/Anhydrit	1E -18	Pulstest	<1	1.5	15.0	09.06.1993
	Anhydrit	1E -18	Pulstest	<1	4.5	5.5	09.06.1993
	Steinsalz/Anhydrit	1E -18	Pulstest	<1	1.5	2.5	10.06.1993
	Anhydrit	1E -18	Pulstest	<1	9.5	10.5	10.06.1993
RB505	Steinsalz/Anhydrit	1E -18	Pulstest	<1	1.5	15.0	10.06.1993
	Steinsalz/Anhydrit	1E -18	Pulstest	<1	1.5	2.5	11.06.1993
	Anhydrit	1E -18	Pulstest	<1	4.5	5.5	11.06.1993
RB506	Steinsalz/Anhydrit	5E -18	Pulstest	<1	41.1	48.4	22.07.1994
	Anhydrit	<5E -17	Pulstest	<1	44.7	52.0	26.07.1994
	Steinsalz/Anhydrit	Druckbeobachtung		<1	31.5	62.5	29.07.1994
	Steinsalz/Anhydrit	Druckbeobachtung		<1	35.5	66.5	01.08.1994
	Steinsalz/Anhydrit	Druckbeobachtung		<1	34.5	65.5	02.08.1994
	Steinsalz/Anhydrit	Druckbeobachtung		<1	33.5	64.5	02.08.1994
	Steinsalz/Anhydrit	5E -18	Pulstest	1	32.5	63.5	02.08.1994
	Steinsalz/Anhydrit	T>1E -13m ²	Pulstest	14	2.2	71.3	03.08.1994
	Steinsalz/Anhydrit	T>1E -13m ²	CR-Test	53	2.2	71.3	18.08.1994
RB508	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	16.5	22.8	27.05.1994
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	16.5	22.8	27.05.1994
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	21.5	27.8	30.05.1994
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	21.5	27.8	30.05.1994
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	26.5	32.8	31.05.1994
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	26.5	32.8	31.05.1994
	Steinsalz	1E -19	Pulstest	1	31.5	37.8	31.05.1994
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	31.5	37.8	01.06.1994
	Steinsalz	<1E -18	Pulstest	<1	36.5	42.8	01.06.1994
	Steinsalz	<1E -19	Pulstest	1	36.5	42.8	01.06.1994
	Steinsalz/Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	41.5	47.8	02.06.1994

Fortsetzung Tabelle 23: Bohrlochtests im Ostfeld

Bohrung	Gesteinsart	k [m ²]	Testart	Dauer [d]	Intervallanfang [m]	Intervallende [m]	Datum
	Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	41.5	47.8	14.06.1994
	Anhydrit	<1E -19	Pulstest	1	49.3	60.1	14.06.1994
	Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	46.5	52.8	15.06.1994
	Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	46.5	52.8	15.06.1994
	Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	51.5	57.8	16.06.1994
	Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	51.5	57.8	16.06.1994
	Steinsalz/Anhydrit	<1E -18	Pulstest	<1	16.6	60,1	17.06.1994
RB601	Steinsalz/Anhydrit	2E -19	Pulstest	1	9.7	264.9	02.02.1995
RB602	Steinsalz/Anhydrit	2E -19	Pulstest	3	9.7	202.8	03.02.1995
RB603	Steinsalz/Anhydrit	1E -19	Pulstest	1	9.7	298.7	26.01.1995
RB604	Steinsalz/Anhydrit	<1E -20	Pulstest	1	10.5	320.8	06.02.1995
RB606	Steinsalz/Anhydrit	T=2E -15m ²	CR-Test	10	9.7	256.5	10.02.1995
	Steinsalz	<3E -18	Pulstest	1	7.0	12.7	21.02.1995
	Steinsalz	4E -18	Pulstest	1	7.0	12.7	22.02.1995
	Steinsalz/Anhydrit	<1E -17	Pulstest	1	12.0	17.7	23.02.1995
	Steinsalz	<2E -18	Pulstest	3	18.0	23.7	24.02.1995
	Steinsalz	<3E -18	Pulstest	1	24.0	29.7	27.02.1995
	Steinsalz/Anhydrit	<2E -18	Pulstest	1	26.0	31.7	28.02.1995
	Steinsalz/Anhydrit	<2E -18	Pulstest	1	31.0	36.7	01.03.1995
	Steinsalz/Anhydrit	<2E -18	Pulstest	1	36.0	41.7	02.03.1995
	Anhydrit	<3E -18	Pulstest	7	41.0	46.7	03.03.1995
	Steinsalz/Anhydrit	T>5E -17m ²	Pulstest	8	47,7	256,5	03.04.1995
RB607	Steinsalz/Anhydrit	T>1E -13m ²	Pulstest	1	27,3	272,7	20.10.1994
	Steinsalz/Anhydrit	T=5E -15m ²	Pulstest	<1	50	272,7	02.11.1994
	Steinsalz/Anhydrit	T=5E -15m ²	Pulstest	<1	81,8	272,7	03.11.1994
RB608	Steinsalz/Anhydrit	2E -18	Pulstest	1	6.0	339.5	20.10.1994
RB611	Steinsalz/Anhydrit	3E -19	Pulstest	<1	9.7	244.3	25.01.1995
RB613	Steinsalz/Anhydrit	<1E -20	Pulstest	15	6,7	308,4	31.08.1995

Die Bohrungen RB 501 - 505 wurden mit jeweils 15 m Teufe vom Flachen 4 aus in den Übergang Steinsalz/Anhydrit gebohrt. Auch die Bohrungen RB 506 und 508 wurden vom Flachen 4 aus geteuft. Sie wurden im Abstand weniger Meter zueinander im Steinsalz angesetzt. Sie erreichen den Anhydrit in ca. 40 - 50 m Teufe und besitzen Längen zwischen 60 und 70 m. Die Bohrungen RB 601 - 604, 606, 607, 608, 611 und 613 durchörtern die das Ostfeld umgebenden Gesteine auf Längen zwischen 200 und 340 m, sie verlaufen überwiegend im Anhydrit.

Übereinstimmend mit den übrigen Bohrlochtests belegen die im Ostfeld durchgeführten Untersuchungen die Heterogenität des Anhydrits. Neben den Tests zur Ermittlung der Permeabilitäten im Nahbereich um die einzelnen Bohrungen wurde ein Interferenzttest zwischen den Bohrungen RB 506, 508 und 607 durchgeführt. In diesem Test wurde nachgewiesen, daß die von diesen Bohrungen im Anhydrit aufgeschlossenen Kluftsysteme über eine Entfernung von 60 m miteinander kommunizieren.

4.1.2 Tests in Kurzbohrungen

An den Kurzbohrungslokationen BL1 bis BL5 wurden jeweils 5 Bohrungen mit unterschiedlichen Teufen zwischen 0,2 und ca. 1 m erstellt, die Teufen der Bohrungen an den Lokationen BL6 und BL7 variieren zwischen 0,4 und 2 m. Als Bohrungsbezeichnung wird jeweils eine gerundete Teufe angegeben. Die Bohrungen wurden mit Ausnahme derjenigen an Lokation BL7 in Höhen zwischen ca. 0,5 und 1,5 m senkrecht in den Stoß geteuft. An Lokation BL7 wurde zusätzlich in die Firste gebohrt. Die Bohransatzpunkte an der jeweiligen Lokation bilden einen Kreis mit ca. 1 m Durchmesser. Alle Kurzbohrungen befinden sich auf der 2. Sohle und durchdrern ausschließlich Steinsalz.

In den Bohrungen wurden Pulstests mit einer Dauer von mindestens einer Stunde durchgeführt. Im Vergleich zu den Tests mit den Doppelpackern waren hier wegen des günstigeren Verhältnisses zwischen dem Volumen und der Oberfläche des abgepackerten Testabschnitts kürzere Versuchsdauern möglich. Das Beispiel des in Abbildung 59 dargestellten Tests zeigt, daß die Unterscheidung zwischen den Permeabilitäten 10^{-19} und 10^{-20} m² mit der einstündigen Versuchsdauer gut möglich ist.

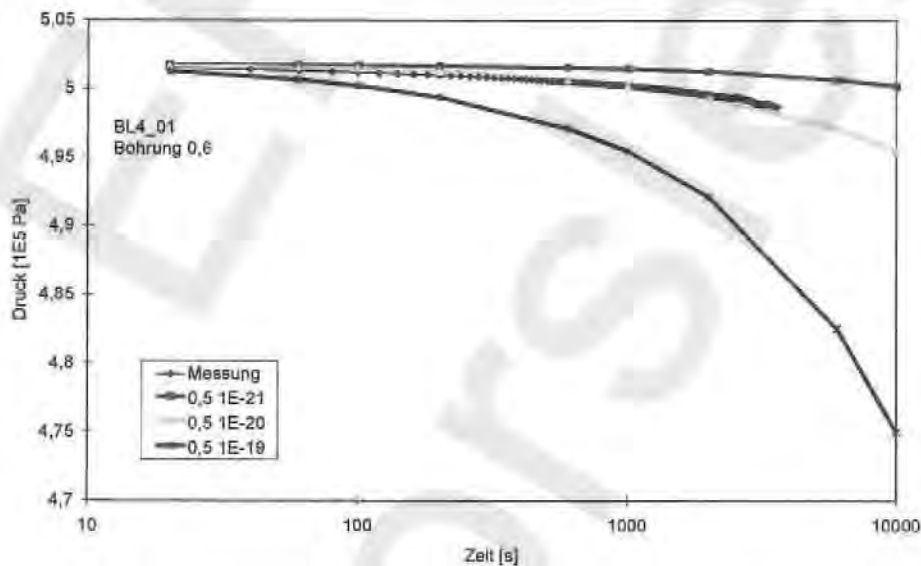


Abbildung 59: Test in einer Kurzbohrung, Dauer 1 Stunde

Die Form der gemessenen Druckverläufe weicht in einigen Tests deutlich vom theoretischen Verlauf ab. Ein Beispiel zeigt Abbildung 60, in der die berechneten Druckkurven wesentlich stärker gekrümmt sind als die Meßkurve.

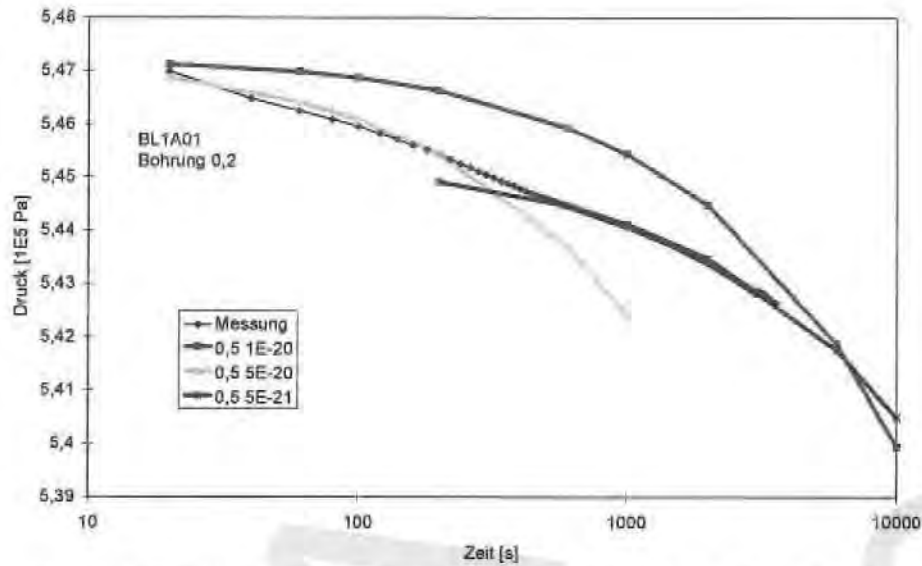


Abbildung 60: Unterschiede zwischen gemessenem und berechneten Druckverläufen

Aus solchen Messungen lassen sich Permeabilitätswerte ableiten, indem die gemessene Druckkurve in unterschiedlichen Testphasen durch unterschiedliche Rechnungen angenähert wird. Für den in Abbildung 60 gezeigten Test ergibt sich für einen Nahbereich um die Bohrung eine Permeabilität von ca. $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ und für das weiter entfernte Gebirge eine Permeabilität von ca. $5 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$. Für diesen Test wird als Ergebnis $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ angegeben, da der für diese Permeabilität berechnete Druckverlauf in homogenem Gebirge am Ende des Tests kleinere Drücke als die Meßwerte aufweist (s. Abbildung 61).

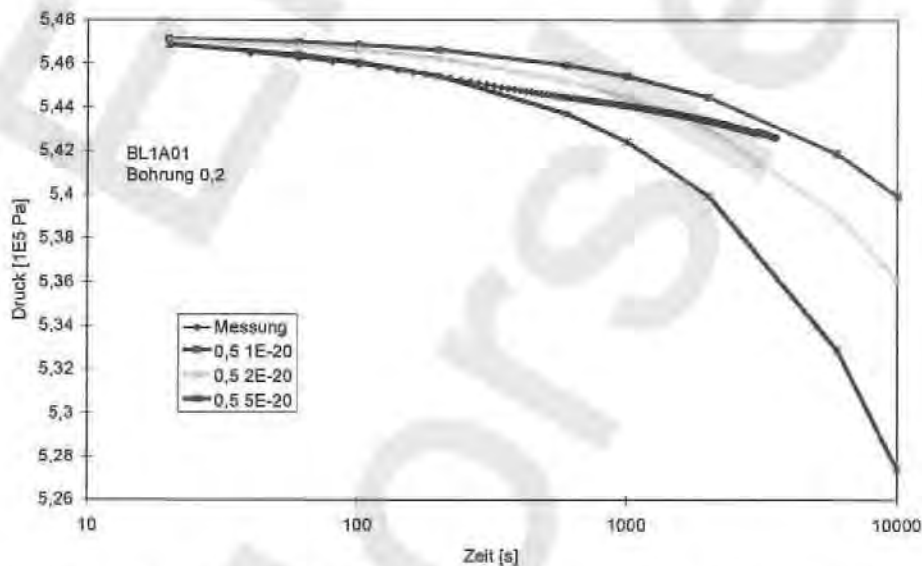


Abbildung 61: Auswertung des Tests aus Abbildung 60 bei Berücksichtigung des gesamten Druckabfalls

Ein weiteres Beispiel für eine starke Abweichung zwischen theoretischer Kurvenform und gemessenem Druckverlauf zeigt Abbildung 62. Der Übergang des zunächst raschen Druckabfalls in einen flachen Verlauf weist auf die Begrenzung des permeablen Gebirgsbereiches hin.

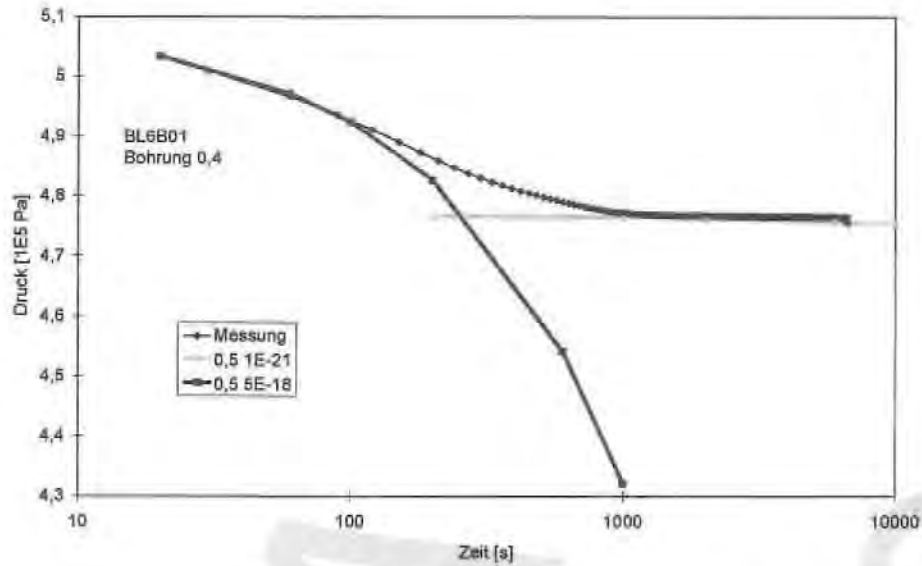


Abbildung 62: Testverlauf mit ausgeprägtem Skineffekt

In Abbildung 63 ist die Meßkurve zusammen mit zwei Druckverläufen eingetragen, die numerisch für ein Composite-Modell berechnet wurden. Für die Berechnung wurde im Nahbereich um das Bohrloch eine Auflockerungszone mit einem Volumen von 300 cm^3 angenommen, in dem die Porosität $0,7 - 0,9 \%$ und die Permeabilität $2 \text{ bis } 4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ beträgt. Dieser aufgelockerte Nahbereich ist umgeben von sehr dichtem Gebirge.

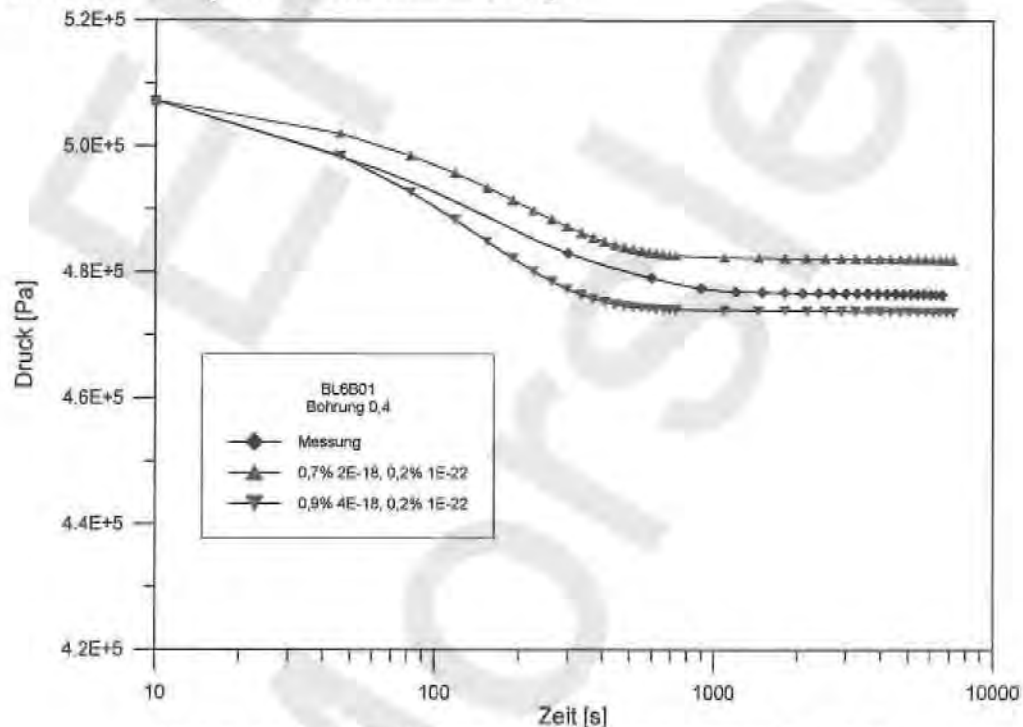


Abbildung 63: Vergleich Messung / numerische Simulation bei Skineffekt

Die Ergebnisse der numerischen Auswertung in Abbildung 63 und der analytischen Auswertung in Abbildung 62 stimmen gut überein. Ebenso gute Übereinstimmungen zwischen analytischer und numerischer Auswertung wurden für solche Tests gefunden, in denen der gemessene Druckverlauf auf ein radialsymmetrisches und homogenes Fließfeld schließen läßt. Für einige

solcher Tests in Kurzbohrungen werden numerisch und analytisch ermittelte Permeabilitätswerte in der folgenden Tabelle 24 verglichen.

Tabelle 24: Vergleich zwischen numerisch und analytisch ermittelten Permeabilitätswerten

	Bohrung	k analytisch [m ²]	k numerisch [m ²]
Lokation BL6a	0,4	1E-18 - 5E-18	1E-18
	0,8	5E-17 - 2E-16	8E-17
	1,2	5E-18 - 2E-17	8E-17
	1,6	2E-21 - 1E-20	5E-21
	2,0	2E-17 - 1E-16	5E-17
Lokation BL6b	0,4	5E-18/1E-21	3E-18/1E-22
	0,8	2E-21 - 1E-20	5E-21
	1,2	2E-21 - 1E-20	5E-21
	1,6	2E-17 - 1E-16	2E-17
	2,0	5E-18 - 2E-17	8E-18

Lokation BL1

An dieser Bohrlokation wurden zwei Bohrlochkränze im Abstand von ca. 5 m zueinander erstellt. Die Lokation befindet sich in der Versatzstrecke zwischen Abbau 1S und Abbau 8N (Abbildung 3, S. 9). In den Tests im Bohrkranz 1a wurden kleine Permeabilitäten um 10^{-20} m² festgestellt. Die durchgeführten Tests sind in der folgenden Tabelle 25 zusammengestellt.

Tabelle 25: Testergebnisse aus Kurzbohrungen an Lokation BL1

Lokation BL1a			Lokation BL1b		
Intervall		k	Intervall		k
von [m]	bis [m]	[m ²]	von [m]	bis [m]	[m ²]
0,14	0,27	2E -20	0,14	0,26	5E -17
0,33	0,46	2E -20	0,14	0,26	5E -17
0,49	0,6	1E -21	0,3	0,42	5E - 18
0,7	0,82	5E -21	0,5	0,62	2E - 20
1,13	1,29	1,5E -20	0,73	0,85	2E - 20
			0,93	1,04	2E - 21

Die Ergebnisse aus den fünf Bohrungen sind in Abbildung 64 aufgetragen. Dabei sind Permeabilitäten unterhalb des relevanten Wertebereichs (Erläuterung in Abschnitt 2, S. 5) mit 10^{-20} m² eingezeichnet.

Die ermittelte Permeabilität im Intervall 1,13 - 1,24 m liegt mit $1,3 \cdot 10^{-20}$ m² nur knapp über der vereinbarten relevanten Untergrenze. Eine Wiederholungsmessung zur Absicherung des Befunds wurde hier nicht durchgeführt (vgl. Kap. 0 und 0, Wiederholungsmessungen an BL2a und BL3a).

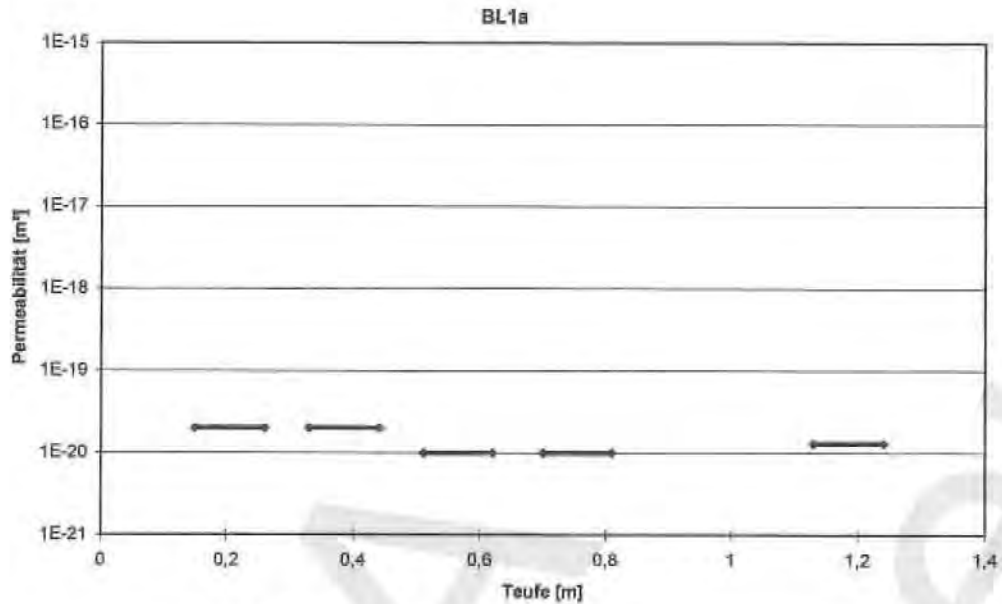


Abbildung 64: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL1a

Die Tests im Bohrkranz 1b ergeben den in Abbildung 65 dargestellten teufenabhängigen Verlauf der Permeabilität.

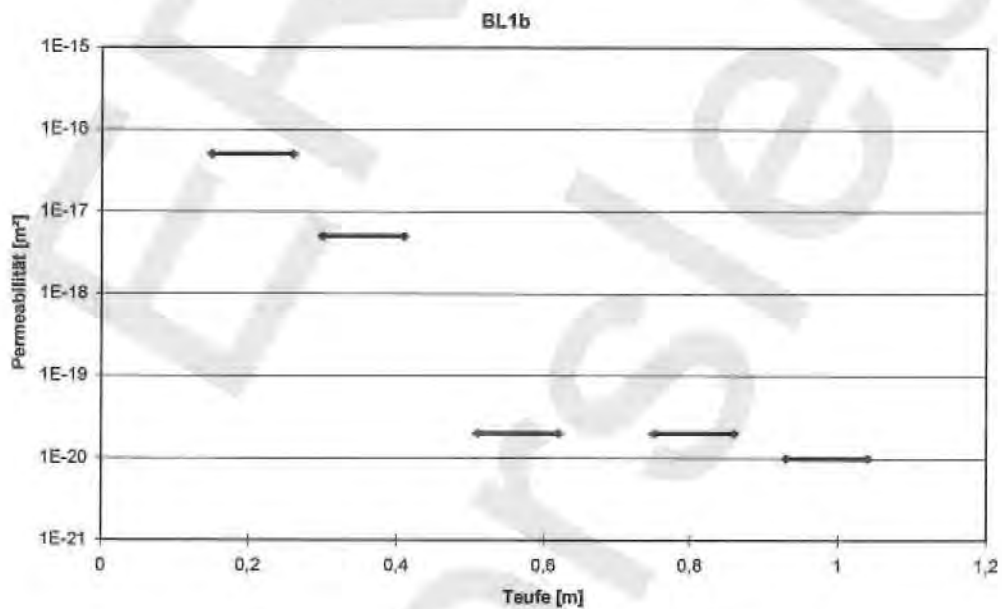


Abbildung 65: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL1b

Lokation BL2

Die Bohrungen der Lokation BL2 wurden in den westlichen Stoß des Abbau 2N in unmittelbarer Nähe zu den Ansatzpunkten der Bohrungen RB 525 - 527 geteuft (Abbildung 4, S. 10). An dieser Lokation wurden zwei Bohrkränze erstellt, die durchgeführten Tests sind in der folgenden Tabelle 26 zusammengestellt.

Tabelle 26: Testergebnisse aus Kurzbohrungen an Lokation BL2

Lokation BL2a			Lokation BL2b		
Intervall		k	Intervall		k
von [m]	bis [m]	[m ²]	von [m]	bis [m]	[m ²]
0,13	0,27	2E - 20	0,13	0,26	2E - 16
0,3	0,41	5E - 21	0,28	0,41	5E - 16
0,51	0,63	5E - 21	0,48	0,62	5E - 21
0,67	0,8	1E - 20	0,69	0,83	1E - 20
0,83	0,97	2E - 19	0,84	0,99	1E - 21
0,73	0,97	1E - 20			

Die Ergebnisse aus dem Bohrkranz 2a sind in Abbildung 66 dargestellt. Die Permeabilität steigt hier im Intervall 84 - 95 cm deutlich an (graue Linie in Abbildung 66).

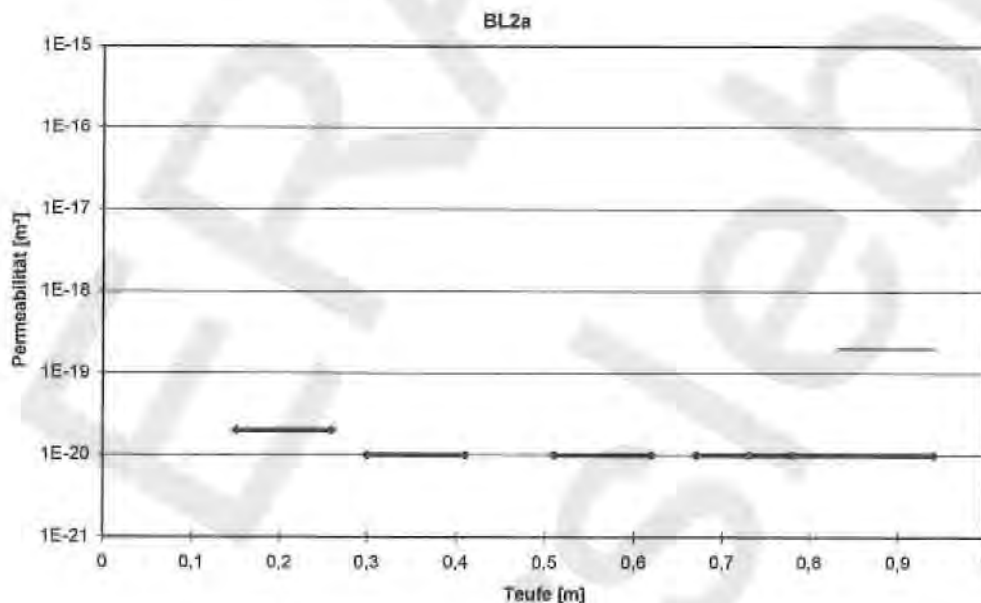


Abbildung 66: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL2a

Die Kurzbohrungen wiesen an den Wandungen teilweise Riefen und Unebenheiten auf. Daher wurde überprüft, ob hier eine mangelhafte Abdichtung des Packers an der Bohrlochwand die Ursache für den erhöhten Gasabfluß aus dem Testintervall war. Dazu wurden zwei weitere Tests in der Bohrung 1,0 durchgeführt, bei denen der Packer nicht im Bohrloch tiefsten gesetzt wurde, sondern 5 bzw. 10 cm höher. Im Test mit 5 cm längerem Testabschnitt wurde eine etwas kleinere Permeabilität als im ersten Test festgestellt. Der Test mit 10 cm höher gesetztem Packer weist in der späten Testphase einen sehr flachen Druckverlauf entsprechend $k < 10^{-20} \text{ m}^2$ auf. Das bedeutet entweder, daß die Wegsamkeiten, die einen Gasabfluß in den vorangegangenen Tests ermöglicht hatten, jetzt im Testintervall eingeschlossen, also auf den Dezimeterbereich begrenzt sind, oder, daß der Gasabfluß in den vorangegangenen Tests auf eine mangelhafte Abdichtung zwischen Packer und Bohrlochwand zurückzuführen war.

Der Permeabilitätsverlauf am benachbarten Bohrkranz ist in Abbildung 67 dargestellt.

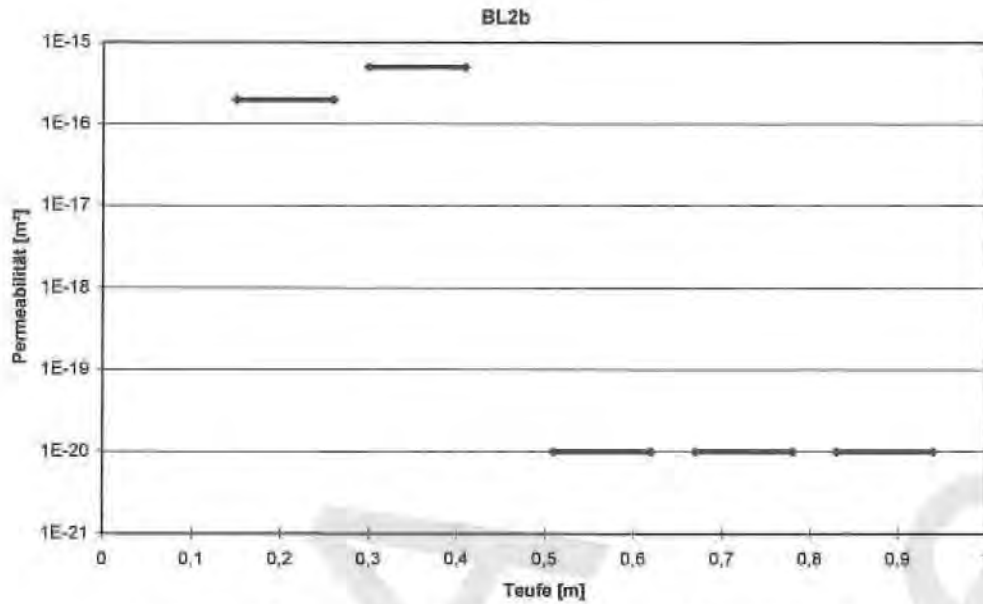


Abbildung 67: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlagerung BL2b

Lokation BL3

Diese Lokation befindet sich östlich des Zentralteils im Ostquerschlag (Abbildung 5, S. 11). Zwei Bohrkränze wurden am nördlichen Stoß gegenüber den Bohrungen RB 538 und 540 erstellt. In diesem Bereich war wenige Wochen vor Durchführung der Bohrlochtests die Strecke mit einer Teilschnittmaschine erweitert wurde.

Wie an der Lokation BL3a wurde im Bohrkranz 2a in der 1 m-Bohrung zunächst eine erhöhte Permeabilität festgestellt. In diesem Bohrloch konnte aber schon mit einem um 5 cm veränderten Packersitz eine Permeabilität unter 10^{-20} m² nachgewiesen werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 27 zusammengestellt.

Tabelle 27: Testergebnisse aus Kurzbohrungen an Lokation BL3

Lokation BL3a			Lokation BL3b		
Intervall		k	Intervall		k
von [m]	bis [m]	[m ²]	von [m]	bis [m]	[m ²]
0,14	0,26	2E - 19	0,15	0,31	5E - 18
0,3	0,42	2E - 20	0,3	0,42	1E - 20
0,48	0,61	5E - 21	0,48	0,6	2E - 21
0,68	0,81	5E - 21	0,69	0,82	2E - 21
0,91	1,02	1E - 19	0,9	1,02	2E - 21
0,86	1,02	1E - 20			

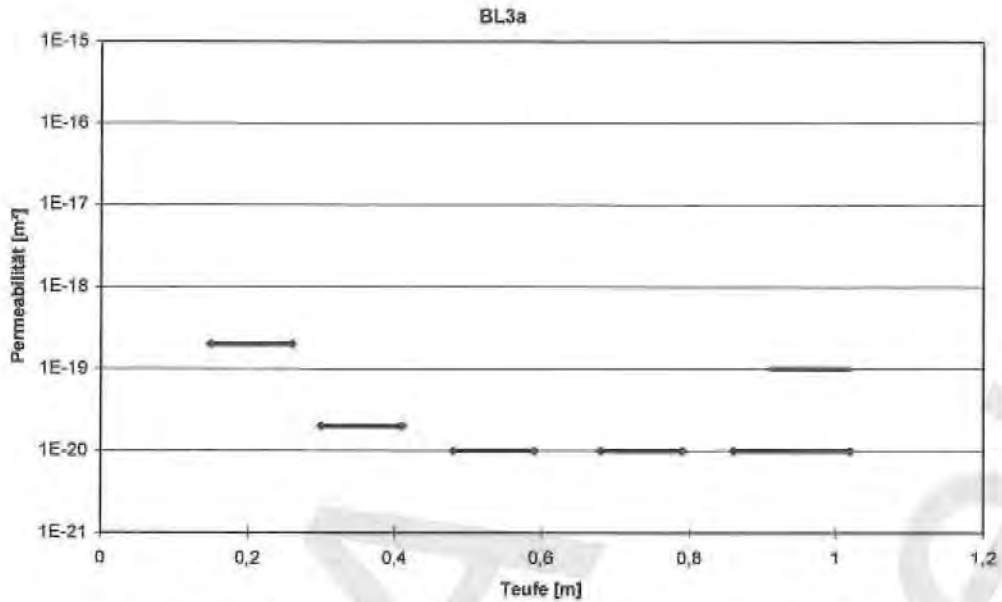


Abbildung 68: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL3a

Im Bohrkranz 3b wird bereits ab 30 cm Entfernung vom Stoß keine erhöhte Permeabilität mehr gemessen.

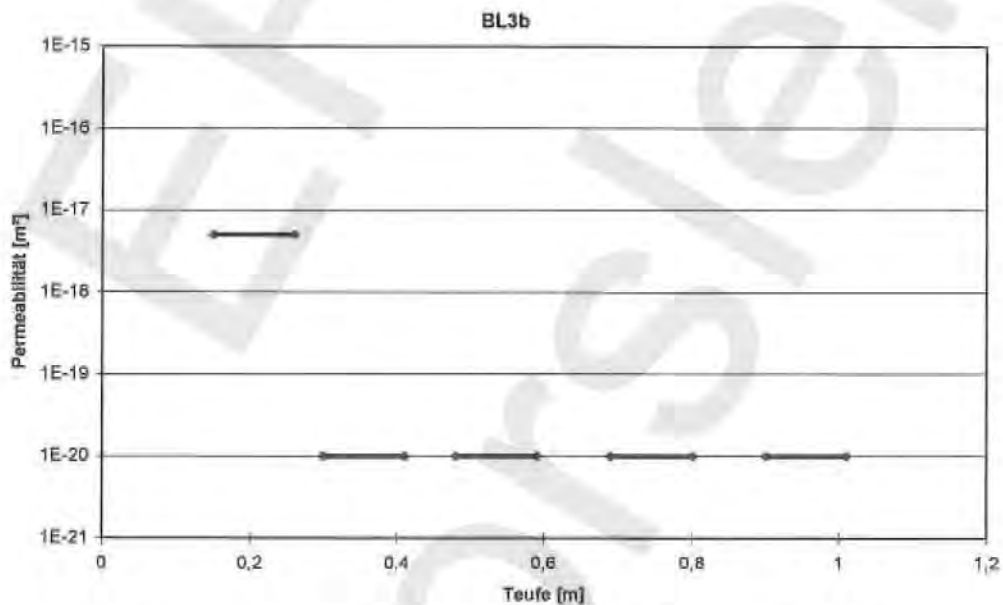


Abbildung 69: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL3b

Lokation BL4

Die Lokation BL4 befindet sich westlich des Zentralteils in einer Nische am nördlichen Stoß des Ostquerschlags (Abbildung 7, S. 12). Durch die Nischenlage war der Streckenstoß an den Ansatzpunkten dieses Bohrkranzes anders als an BL3 nicht von der Streckenaufweitung betroffen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 zusammengestellt.

Tabelle 28: Testergebnisse aus Kurzbohrungen an Lokation BL4

Lokation BL4		
Intervall		k
von [m]	bis [m]	[m ²]
0,14	0,26	2E -19
0,31	0,42	1E -19
0,49	0,6	1E -20
0,7	0,81	1E -19
0,65	0,81	1E -20
0,9	1,01	2E -20

In der Bohrung 0,8 wurde im ersten Test eine Permeabilität über 10^{-20} m² festgestellt. In einem Wiederholungstest, in dem der Packer in 5 cm geringerer Teufe gesetzt wurde, konnte das Bohrloch aber gut durch den Packer verschlossen und eine Permeabilität $< 10^{-20}$ m² nachgewiesen werden. In der Bohrung 1,0 wurde keine Wiederholungsmessung durchgeführt. Der resultierende teufenabhängige Permeabilitätsverlauf ist in Abbildung 70 dargestellt.

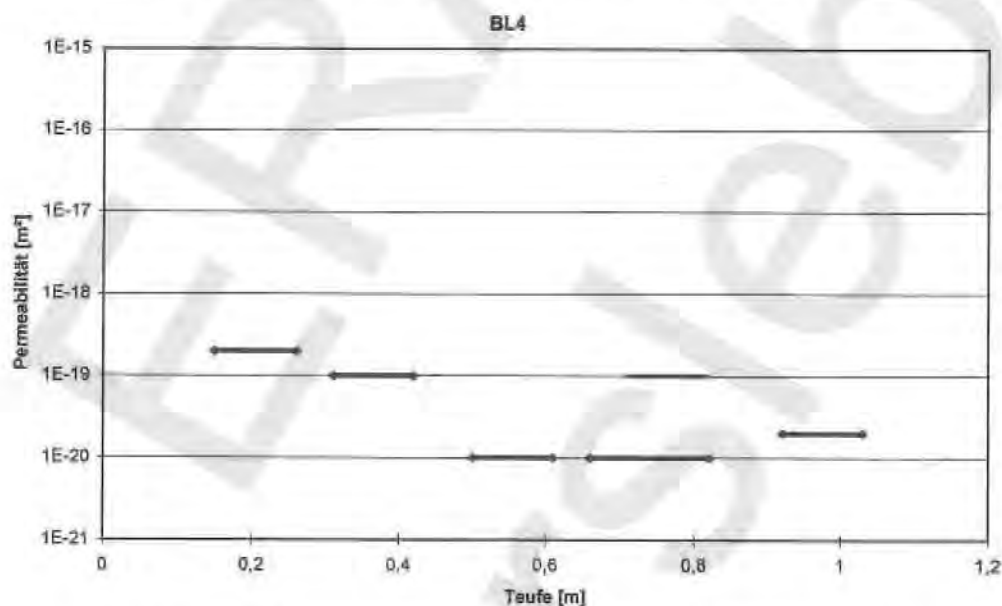


Abbildung 70: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL4

Lokation BL5

Diese Lokation befindet sich ebenso wie BL4 westlich des Zentralteils am nördlichen Stoß des Ostquerschlags (Abbildung 7, S. 12), sie ist allerdings nicht in einer Nische platziert. Gegenüber dieser Lokation mündet die Richtstrecke nach Südosten in den Ostquerschlag. Die Testergebnisse an dieser Lokation sind in Tabelle 29 zusammengestellt.

Tabelle 29: Testergebnisse aus Kurzbohrungen an Lokation BL5

Lokation BL5		
Intervall		k
von [m]	bis [m]	[m ²]
0,14	0,26	2E -19
0,3	0,41	2E -20
0,51	0,62	5E -20
0,71	0,82	1E -20
0,87	0,98	1E -20

Die folgende Abbildung 71 zeigt den teufenabhängigen Permeabilitätsverlauf.

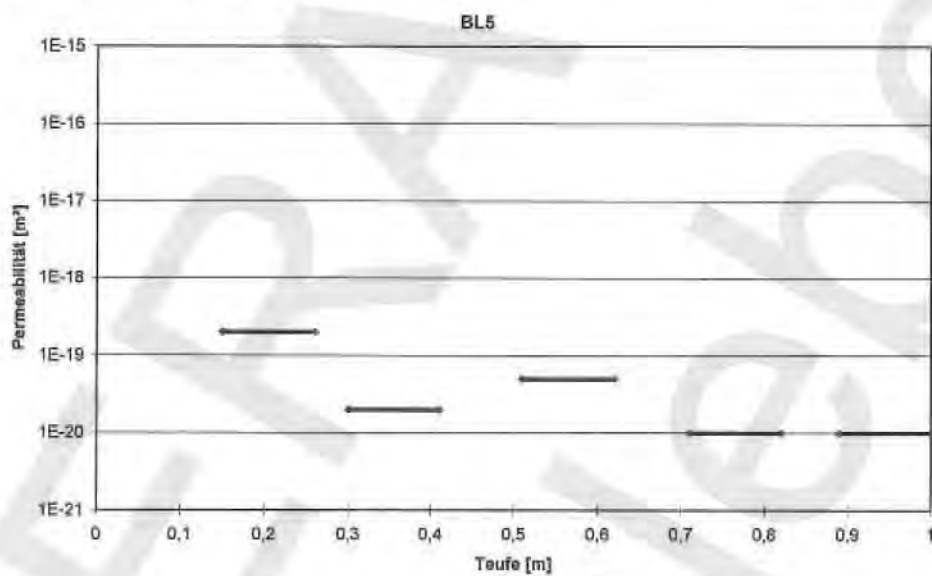


Abbildung 71: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlotation BL5

Lokation BL6

An dieser Lokation am nördlichen Stoß des Abbau 3N wurden zwei Bohrkränze mit Teufen bis 2 m erstellt (Abbildung 4, S. 10). Die Testergebnisse an dieser Lokation sind in Tabelle 30 zusammengestellt.

Tabelle 30: Testergebnisse aus Kurzbohrungen an Lokation BL6

Lokation BL6a			Lokation BL6b		
Intervall		k	Intervall		k
von [m]	bis [m]	[m ²]	von [m]	bis [m]	[m ²]
0,32	0,43	5E -18	0,27	0,43	1E -21
0,68	0,84	1E -16	0,66	0,81	1E -21
1,03	1,18	1E -17	1,02	1,18	1E -21
1,53	1,66	2E -21	1,52	1,63	5E -17
1,88	2	5E -17	1,86	2,03	1E -17

Abbildung 72 und Abbildung 73 zeigen die Permeabilitätsverläufe.

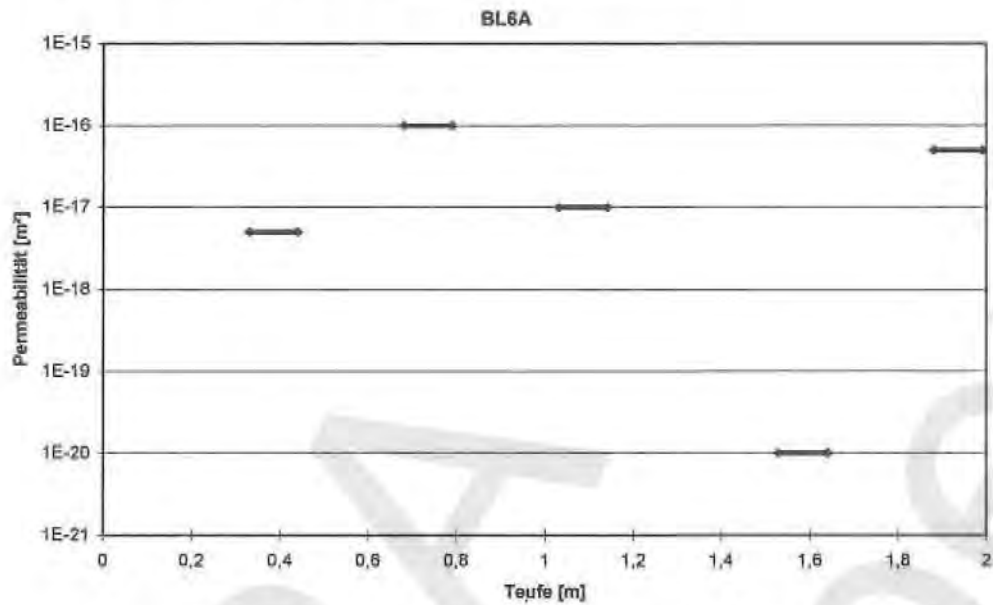


Abbildung 72: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL6a

Die hohe Permeabilität in 2 m Teufe im Bohrkranz 6a wurde in zwei Wiederholungsmessungen mit um jeweils 5 cm höher gesetztem Packer bestätigt. In den gleichzeitig verschlossenen Nachbarbohrungen (0,8 und 1,6 m-Bohrung) war während des Tests in der 2,0 m-Bohrung keinerlei Druckänderung meßbar.

Ein hochdurchlässiger Bereich in 2 m Teufe wird auch im ca. 10 m westlich von Bohrkranz 6a gelegenen Bohrkranz 6b gefunden.

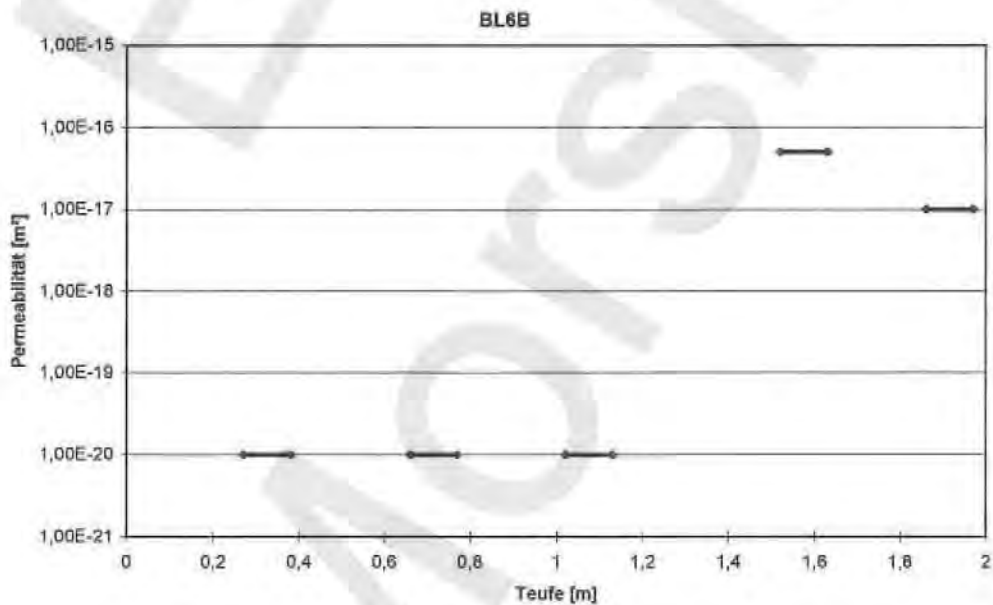


Abbildung 73: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL6b

In der Nähe der beiden Bohrkränzen war eine Bohrung mit 10 m Teufe angelegt worden, um einen Test mit Salzlösung durchzuführen. In dieser Bohrung wurde festgestellt, daß erhöhte Permeabilitäten unterhalb 2 m Teufe nicht auftreten (Versuch LB202/3, Abschnitt 4.1.3.1).

Lokation BL7

Die Bohrlokation BL7 befindet sich in der Richtstrecke nach Südosten ca. 80 m vom Ostquerschlag entfernt (Abbildung 7, S. 12). Hier wurden Bohrkränze mit Teufen bis 2 m in beide Streckenstöße sowie in die Firste gebohrt. Der Bohrkranz 7a wurde am westlichen Stoß erstellt, Bohrkranz 7b gegenüber und Bohrkranz 7c in der Firste.

Die Kontur der Strecke ist an diesem Ort seit mehreren Jahrzehnten nicht verändert worden und die Lokation befindet sich in vergleichsweise großer Entfernung zu anderen Grubenbauen. Die Lokation bietet daher gute Voraussetzungen für die Untersuchung der Auflockerungszone um einen Einzelhohlraum.

Die Testergebnisse an dieser Lokation sind in Tabelle 31 zusammengestellt.

Tabelle 31: Testergebnisse aus Kurzbohrungen an Lokation BL7

Lokation BL7a			Lokation BL7b			Lokation BL7c		
Intervall		k	Intervall		k	Intervall		k
von [m]	bis [m]	[m ²]	von [m]	bis [m]	[m ²]	von [m]	bis [m]	[m ²]
0,32	0,44	1E -15	0,28	0,45	2E -16	0,28	0,42	5E -21
0,72	0,83	2E -21	0,74	0,85	2E -21	0,69	0,82	1E -20
1,03	1,2	1E -21	1,06	1,24	1E -21	1,07	1,2	5E -21
1,47	1,63	2E -21	1,5	1,65	1E -21	1,52	1,66	8E -21
1,88	2,04	1E -21	1,88	2,01	2E -21	1,92	2,07	5E -21

Die ermittelten teufenabhängigen Permeabilitätsverläufe werden in den folgenden Abbildungen dargestellt.

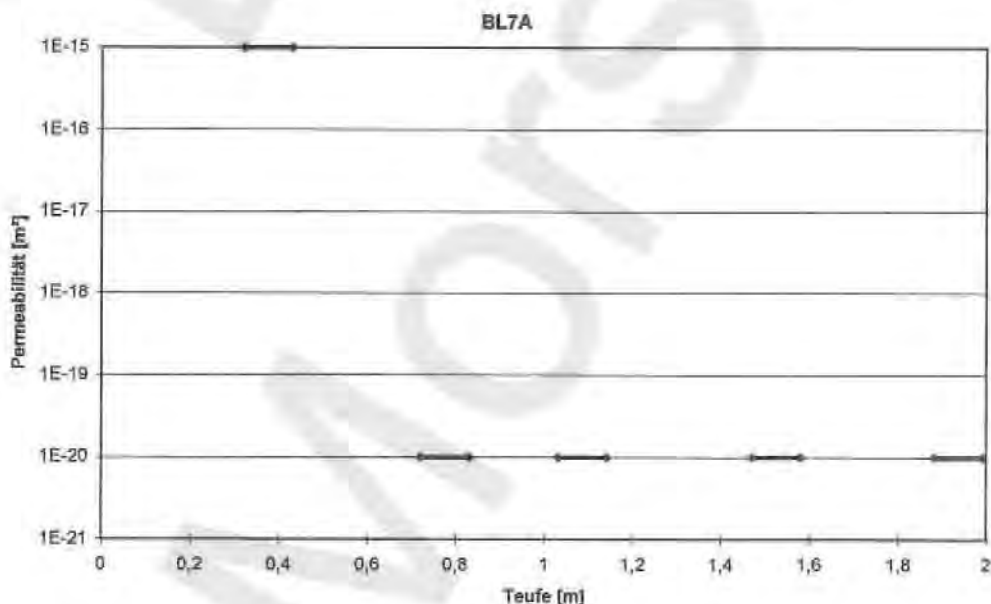


Abbildung 74: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL7a

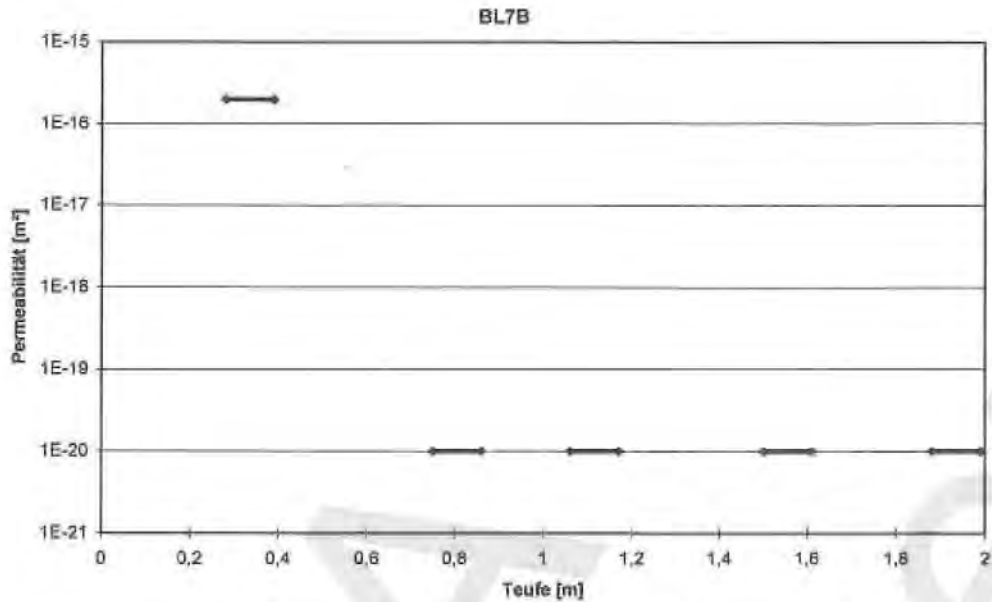


Abbildung 75: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL7b

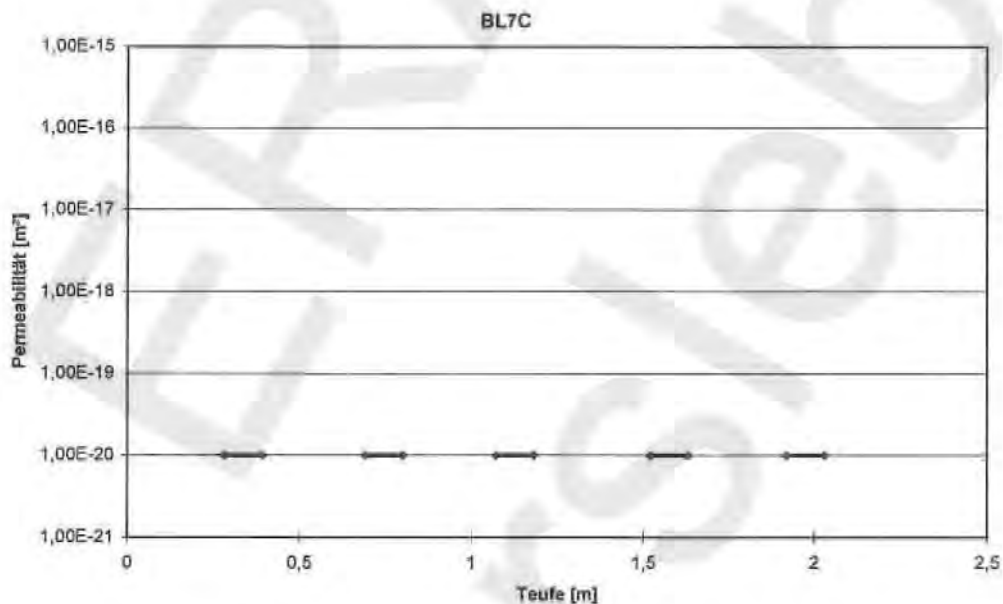


Abbildung 76: Ergebnisse der Kurzbohrungs-Tests an Bohrlokation BL7c

Im Bohrkranz 7a wurde eine hydraulische Kommunikation zwischen der Bohrung 0,4 und den Nachbarbohrungen 0,8 und 1,2 festgestellt. Im Bohrkranz 7b war nur in der Bohrung 0,8 eine Druckänderung während des Pulstests in der Bohrung 0,4 feststellbar.

Die Bohrungen wurden als Testbohrung jeweils ca. 0,1 m über dem Bohrlochtiefsten abgepackert, als Beobachtungsbohrung jedoch am Bohrlochmund. Folglich steht die Feststellung einer hydraulischen Leitfähigkeit in einem Interferenztest nicht im Widerspruch zur Feststellung der hydraulischen Dichtheit in einem Pulstest, da unterschiedliche Bohrlochabschnitte am Test beteiligt sind.

4.1.3 Tests mit Salzlösung

Um sicherzustellen, daß die Undurchlässigkeit des Salzgesteins, die in vielen Tests mit Gas gefunden wurde, nicht nur durch einen kapillaren Sperrdruck vorgetäuscht wird, wurden Kontrollversuche mit Salzlösung als Testfluid durchgeführt. Wegen der vollständigen Benetzbarkeit von Salzgestein mit Wasser müssen zur Injektion von Wasser in vorhandene Wegsamkeiten unabhängig vom Sättigungszustand keine Kapillarkräfte überwunden werden.

Bei der Planung der Gastests wurde angenommen, daß durchströmbare Wegsamkeiten im Salzgestein zumindest teilweise mit Gas gesättigt sind, wobei das Gas grundsätzlich als kontinuierliche Phase, also mit einem Sättigungsgrad oberhalb der Mobilitätsgrenze vorkommt. Wenn diese Annahme nicht zutrifft und in Wegsamkeiten neben Lösung nur diskontinuierlich verteiltes oder überhaupt kein Gas vorkommt, muß zur Injektion von Gas in diese Wegsamkeiten der kapillare Sperrdruck überwunden werden. Je nach Geometrie der Wegsamkeit kann der kapillare Sperrdruck für ein Gestein mit 0,1 % Porosität und einer Permeabilität von 10^{-20} m² Werte bis ca. 40 MPa annehmen. In diesem Fall würde in einem Bohrlochtest mit Gas bei 0,5 MPa Injektionsdruck trotz vorhandener Wegsamkeiten kein Druckabfall im Testintervall stattfinden.

4.1.3.1 Steinsalz

Für den Intervalltest mit Salzlösung wurde die Bohrung RB 539 ausgewählt, die aufgrund ihrer großen Entfernung zu Abbaukammern für die Ermittlung der Permeabilität von unverritztem Salzgestein ausgewählt worden war. In dieser Bohrung war im Abschnitt 3,6 - 20,02 m (Versuch 539103/5) der Testdruck mit Gas als Testmedium über 9 Tage nahezu konstant auf dem Wert 0,5 MPa geblieben.

Für den Test wurde eine NaCl-gesättigte Lösung in das abwärts geneigte Bohrloch gefüllt. Ein einzelner Schlauchpacker wurde so weit in die Bohrung geschoben, bis er vollständig mit Lösung überschichtet war, und anschließend gesetzt. Mit einer Handpumpe wurde dann der Druck im Testabschnitt erhöht und die Injektionsleitung verschlossen. Der Druck im Testabschnitt fiel anfangs schnell ab und wurde in den ersten Stunden des Versuchs mehrfach wieder erhöht. Eine weitere Druckerhöhung wurde am nächsten Tag vorgenommen. Der Druckverlauf ist in Abbildung 77 dargestellt.

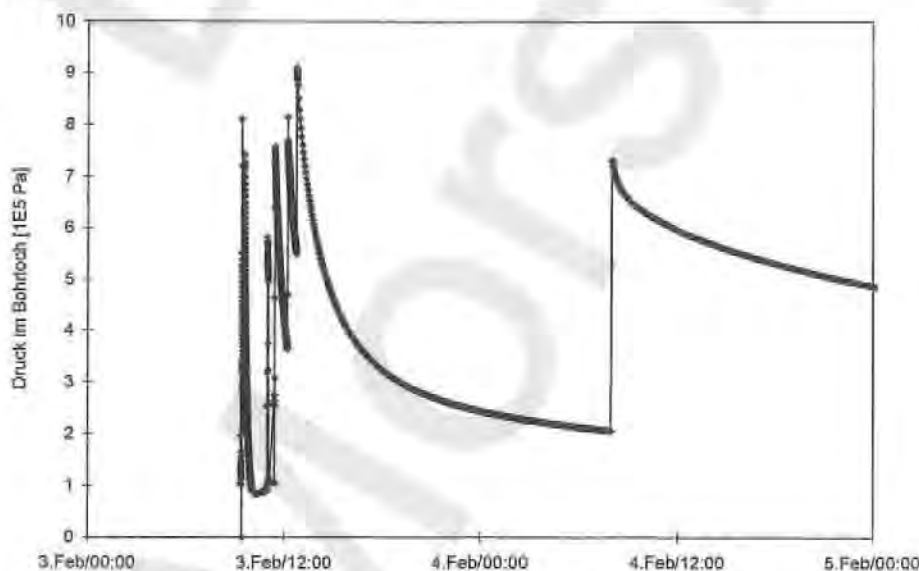


Abbildung 77: Druckverlauf Test 539LSG, Bohrung RB 539, Testfluid Salzlösung

Die Bauform des verwendeten Packers bedingt, daß der Einschluß von Luftblasen unterhalb des Packers nicht zu vermeiden war. Diese eingeschlossene Luftmenge löst sich nach der Druckbeaufschlagung des Testabschnitts in der Flüssigkeit. Wegen der geringen Kompressibilität der Flüssigkeit fällt während dieses Lösungsvorganges der Druck schnell ab. Die anfängliche Druckkurve ist daher nicht zur Permeabilitätsbestimmung geeignet, da ihr Verlauf nicht durch das Abpressen von Testfluid in das Gebirge bestimmt wird. Die Geschwindigkeit des Lösevorgangs nimmt mit der Zeit ab, da die obere Flüssigkeitsschicht mit gelöstem Gas gesättigt wird und die Geschwindigkeit der weiteren Lösung durch die Geschwindigkeit des diffusiven Transports von gelöstem Gas innerhalb der Flüssigkeit bestimmt wird.

Wenn unterstellt wird, daß während des vom 3. bis 4. Februar gemessenen Druckverlaufs keine weitere Lösung von Gas stattfindet, sondern der Druck aufgrund eines Fluidstroms in das Gebirge abnimmt, ergibt sich eine Permeabilität von 10^{-18} - 10^{-19} m².

Nachdem der Druck am 4. Februar erneut erhöht worden war, wurde der in Abbildung 78 dargestellte weitere Druckverlauf gemessen.

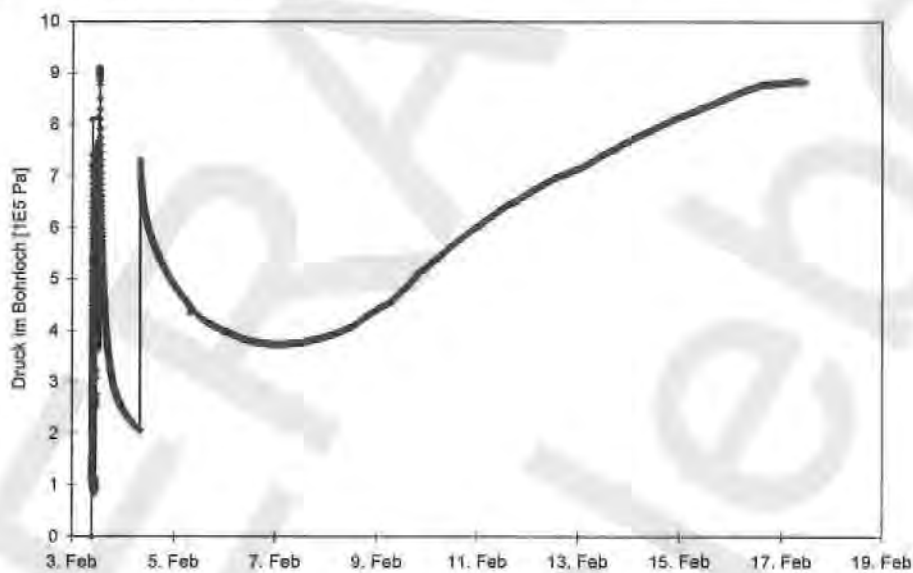


Abbildung 78: Vollständiger Druckverlauf Test 539LSG

Als Ursache für den späteren Wiederanstieg des Druckes ist Leckage-Gas aus dem Packer anzusehen, das in den Testabschnitt eindringt. Bohrlochkonvergenz und Temperaturänderung scheiden als Ursachen wegen des zu geringen Effekts bzw. der zu kurzen Dauer als Ursachen aus. Leckage-Gas, das in den Testabschnitt eindringt, beeinflusst wegen der geringen Kompressibilität der Salzlösung den Druck wesentlich stärker als in Tests mit Gas als Testmedium.

Wegen des störenden Einflusses des Leckage-Gas wurde ein weiterer Test mit Lauge als Testmedium durchgeführt und dabei ein mechanisch setzbarer Packer, bei dem kein Leckage-Gas auftreten kann, verwendet. Für diesen Test wurde am nördlichen Stoß des Abbau 3N auf der 2. Sohle eine leicht abwärts geneigte Bohrung mit 10 m Teufe im Steinsalz erstellt (Abbildung 4, S. 10). Ein zunächst mit Gas durchgeführter Test ergab für den Abschnitt 2 - 8 m eine Permeabilität von 1 bis $2 \cdot 10^{-21}$ m². Im Test mit gesättigter NaCl-Lösung, der im selben Bohrlochabschnitt durchgeführt wurde, wurde der in Abbildung 79 dargestellte Druckverlauf gemessen.

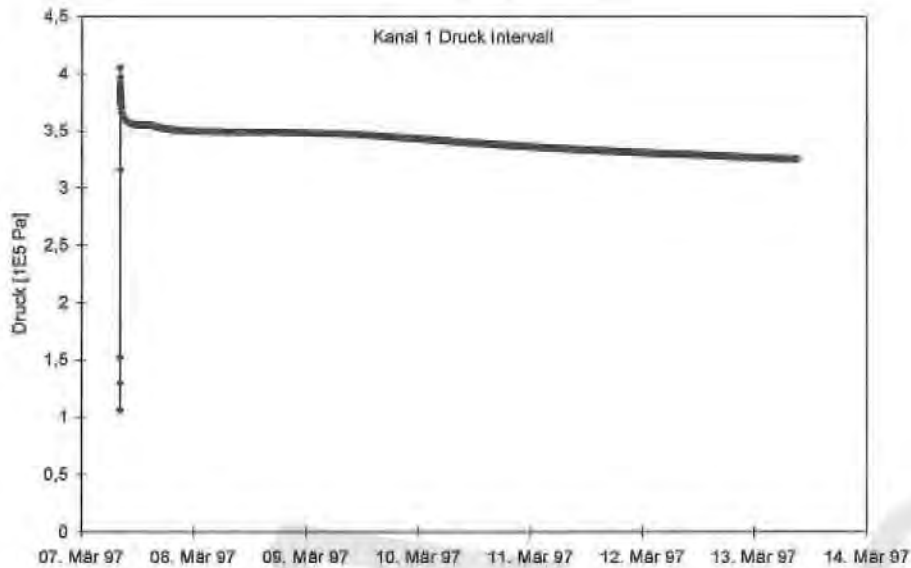


Abbildung 79: Druckverlauf im Test LB202/3, Testfluid Salzlösung

Auch für diesen Test muß davon ausgegangen werden, daß in den Vertiefungen an der Stirnfläche des Packers Luft eingeschlossen wurde, die sich nach der Druckaufgabe in der Flüssigkeit löst. Dieser Vorgang kann als Ursache für den Druckabfall in den ersten Minuten des Tests angesehen werden.

Die Auswertung dieses Versuchs wurde mit zwei unterschiedlichen Anfangsdrücken durchgeführt. Eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Druckverlauf wird erzielt, wenn der Druck am Ende des als Lösevorgang interpretierten Druckabfalls als Anfangsdruck gesetzt wird. Die Permeabilität beträgt dann $5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$. Aber auch, wenn der Lösevorgang nicht berücksichtigt wird und der Druckverlauf von einem höheren Anfangsdruck aus berechnet wird, ergibt sich, daß der Druck bei einer Permeabilität von 10^{-20} m^2 bereits nach einem Tag deutlich stärker abgefallen wäre als im Test LB202/3 (s. Abbildung 80), die tatsächliche Permeabilität also deutlich kleiner als 10^{-20} m^2 ist.

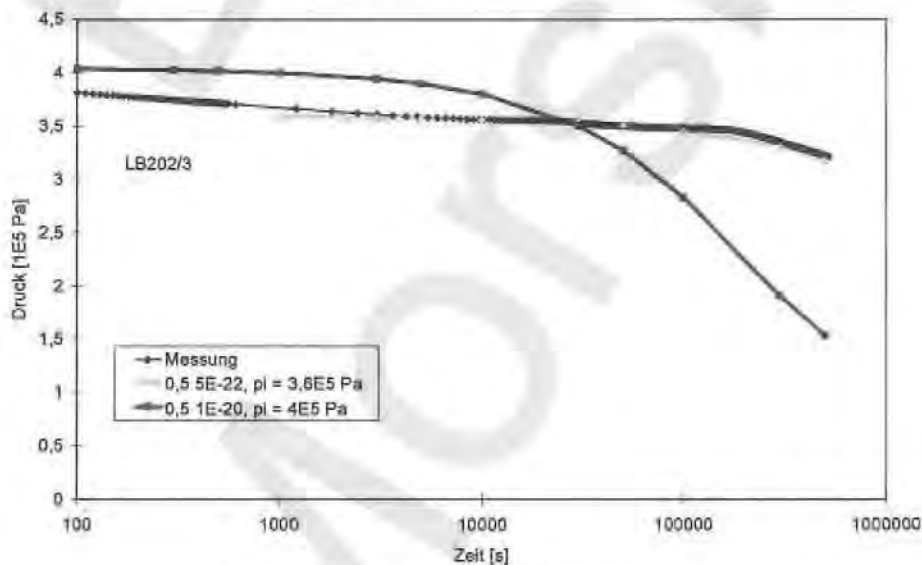


Abbildung 80: Auswertung des Tests LB202/3

4.1.3.2 Salztön

Die in den Bohrungen RB 522, 523 und 524 erbohrten Kerne fühlten sich im Bereich der tonigen Lagen feucht an. Deshalb wurde auch im Salztön ein Test mit Flüssigkeit durchgeführt. Dazu wurde im Flachen 2 westlich vom Kalilager D eine 3 m lange Bohrung erstellt (Abbildung 2, S. 9). Nach dem Befüllen mit NaCl gesättigter Lösung mußte sofort der Packer gesetzt werden, da das Gestein unter Einwirkung der Flüssigkeit zerfiel und ein Spannen des Packers an der Bohrlochwandung schon nach einigen Minuten nicht mehr möglich war.

In Abbildung 81 ist der Druckverlauf dargestellt, der innerhalb einer Woche gemessen wurde. Auch hier wird ein Druckanstieg durch den Zutritt von Leakage-Gas verzeichnet. (In einem Zwischenbericht zu den durchgeführten hydraulischen Untersuchungen wurde dieser Zutritt nicht berücksichtigt und dadurch die Permeabilität des Salztöns nicht korrekt eingeschätzt.)

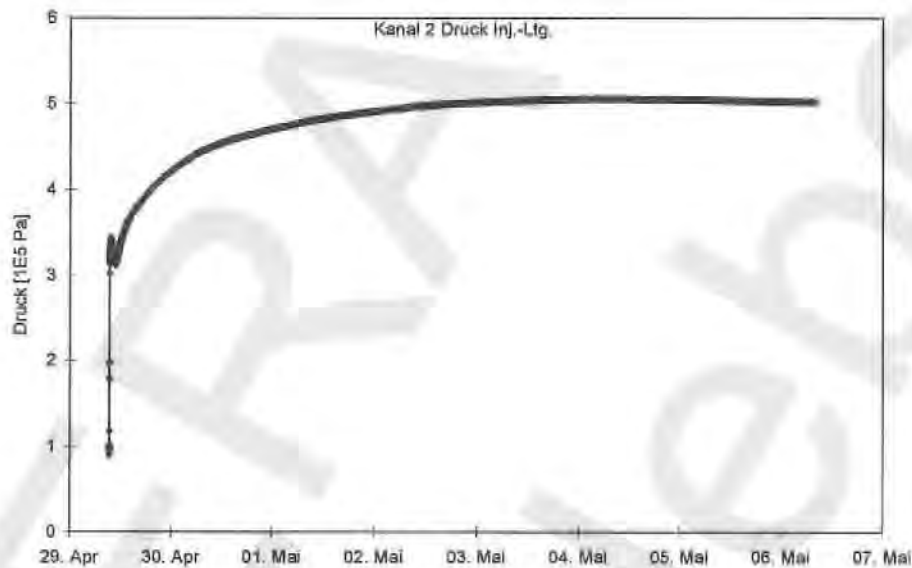


Abbildung 81: Test im Salztön mit Salzlösung, Flachen 2

Ein Test mit einem mechanischen Packer konnte im Salztön aufgrund der starken Beanspruchung der Bohrlochwand beim Setzen nicht durchgeführt werden. Um den dargestellten Schlauchpacker-Test auswerten zu können, muß der Einfluß des Leakage-Gases aus dem gemessenen Druckverlauf herausgerechnet werden. Der gemessene Druckverlauf ergibt sich aus der Überlagerung von drei Vorgängen: Gas strömt aus dem Packer in den Testabschnitt, dadurch steigt der Druck; Lösung strömt aus dem Testabschnitt in das Gebirge, dadurch sinkt der Druck; Gas wird in der Flüssigkeit gelöst, dadurch sinkt der Druck. Die Vergrößerung des gemessenen Druckverlaufs am Beginn des Tests zeigt, daß zunächst die drucksenkenden Vorgänge überwiegen (Abbildung 82, Phase 1).

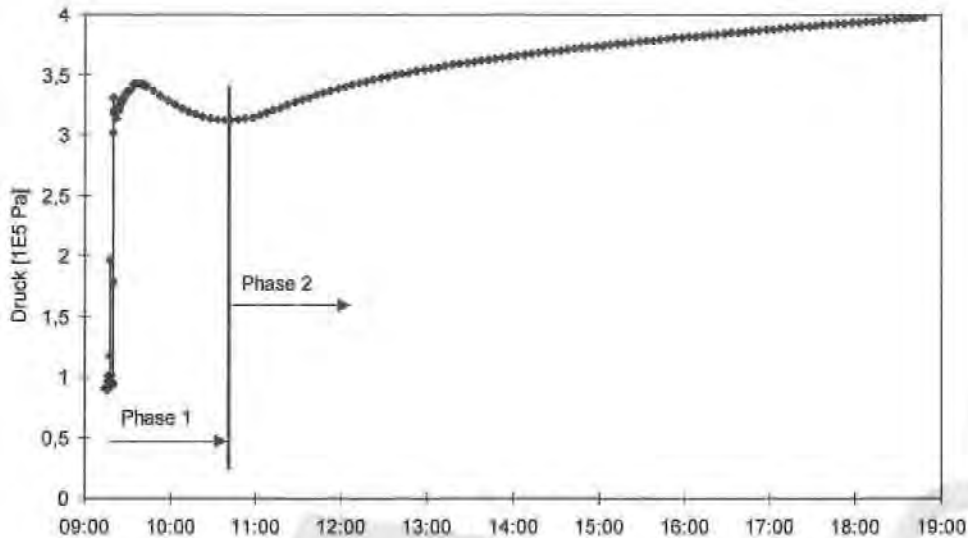


Abbildung 82: Druckverlauf am Beginn des Tests aus Abbildung 81

Der Abfluß von Lösung aus dem Bohrloch wird mit zunehmender Ausbreitung der Druckfront in das Gebirge kleiner. Ebenfalls nimmt die Lösung von Gas in der Flüssigkeit durch die Aufsättigung der oberen Flüssigkeitsschicht ab. Schließlich überwiegt die Druckzunahme durch den Gaszufluß (Phase 2). Die Druckzunahme im Bohrloch ergibt sich aus dem Druckverlust des Packers, dem äquivalenten Gasvolumenstrom in den Testabschnitt und der dadurch bewirkten Sättigungsänderung und damit Kompressibilitätsänderung im Testabschnitt. Für die Druckabnahme durch Lösung von Gas in der Testflüssigkeit muß die Lösegeschwindigkeit berücksichtigt werden, für die eine exponentielle Abhängigkeit von der Zeit angenommen wird. Die Exponentialfunktion wird durch Variation des Vorfaktors und des Exponenten so angepaßt, daß die Subtraktion der durch Lösung verursachten Druckänderung vom gemessenen Druckverlauf eine Druckkurve ergibt, die monoton verläuft und am Testende auf Atmosphärenniveau konstant bleibt. Der so bereinigte Druckverlauf ist in Abbildung 83 dargestellt.

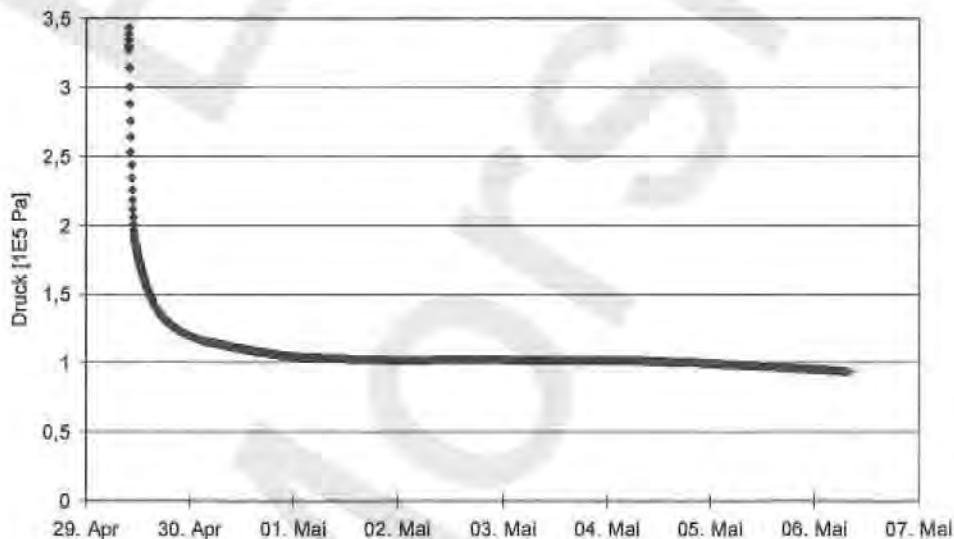


Abbildung 83: Druckverlauf aus Abbildung 81 ohne Einfluß von Leckage-Gas

Für diesen Druckverlauf ergibt die Auswertung als Pulstest die Permeabilität $2 \text{ bis } 5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$.

Für die Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften des Salztons ist neben der Abgabe der ermittelten Permeabilität die Beobachtung bedeutsam, daß der Salzton beim Kontakt mit Wasser seine Struktur verliert und mit der Flüssigkeit ein fließfähiges Gemisch bildet.

4.1.3.3 Anhydrit

Einige der erbohrten Kerne aus dem Anhydrit waren feucht, so daß ebenso wie im Salzton geklärt werden mußte, ob Kapillareffekte für die bereichsweise ermittelte Undurchlässigkeit des Anhydrits ursächlich sind. Der in Abbildung 84 dargestellte Test wurde auf der dritten Sohle im Ostquerschlag durchgeführt. Das für den Test erstellte Bohrloch hat eine Länge von 1,55 m. In 1 m Tiefe war ein mechanischer Packer gesetzt worden, als Testfluid wurde NaCl gesättigte Lösung verwendet.

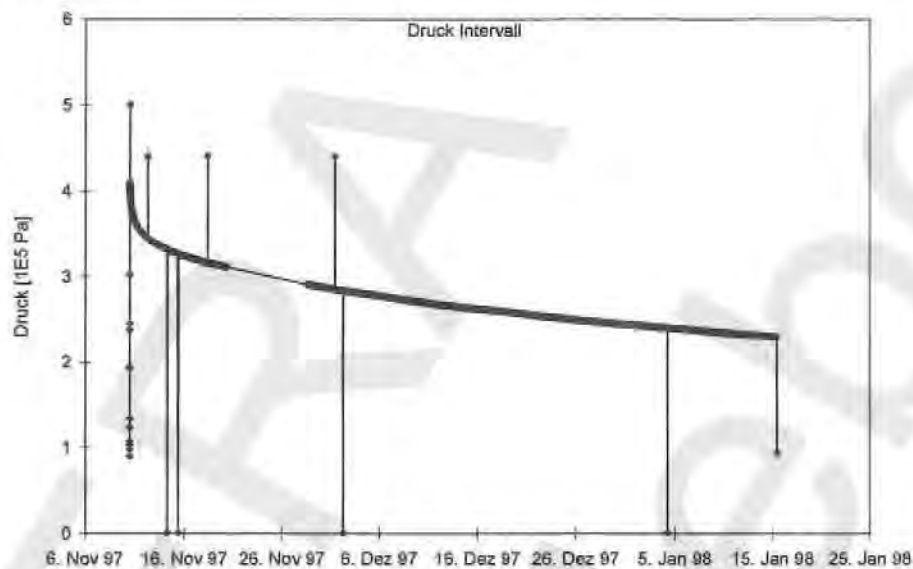


Abbildung 84: Test im Anhydrit mit Salzlösung als Testfluid

Aus dem gemessenen Druckverlauf ergibt sich, daß die Permeabilität des Anhydrits für Lösung deutlich kleiner als 10^{-21} m^2 ist.

4.2 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Zur Ermittlung der Permeabilitäten der Salzgesteine im Grubengebäude Morsleben wurden hydraulische in-situ-Tests durchgeführt.

Unterschiede in den Permeabilitätswerten haben außerhalb des Wertebereichs 10^{-15} m^2 bis 10^{-20} m^2 keine oder nur vernachlässigbare Unterschiede in der Barrierewirkung des Gesteins zur Folge. Deshalb werden Permeabilitäten außerhalb dieses Wertebereichs pauschal mit $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ oder $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ angegeben.

4.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse nach permeabilitätsrelevanten Kriterien

4.2.1.1 Mechanische Beanspruchung

Unverritztes Steinsalz

Die Tests weisen nach, daß Steinsalz im unverritzten Zustand keine Durchlässigkeit größer als 10^{-20} m^2 besitzt. Dieses Resultat wird sowohl mit Gas als auch mit Salzlösung als Strömungsmedium erzielt.

Zone um Einzelhohlräume

Die Auflockerungszone um Einzelhohlräume ist um Strecken (Querschnittsfläche $\approx 10 \text{ m}^2$) weniger als 1 m mächtig, an den meisten der untersuchten Lokationen wurde eine Ausdehnung senkrecht zum Stoß bzw. zur Firste von ca. 50 cm ermittelt. In Teufen um 20 cm werden Permeabilitäten bis 10^{-15} m^2 angetroffen. Dieser Sachverhalt wird illustriert durch die folgende Abbildung 85, in der die Ergebnisse aus den durchgeführten Tests im Nahbereich um Strecken eingezeichnet sind.

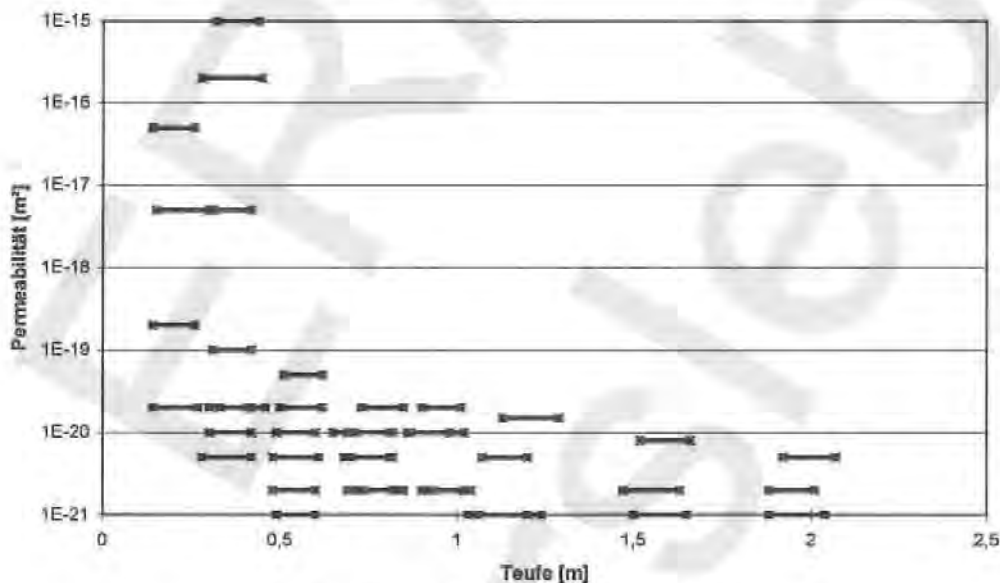


Abbildung 85: Ergebnisse aus Tests im Nahbereich um Strecken

Die Auflockerungszonen um große Abbaukammern (Querschnittsfläche $\approx 10^2 - 10^3 \text{ m}^2$) reichen bis ca. 2 m in das Gebirge hinein. Diese Erstreckungen werden beobachtet, sofern keine zusätzlichen mechanischen Belastungen aufgrund der Nähe zu anderen großen Abbaukammern oder zur Grenze von Gesteinen mit unterschiedlichen Festigkeiten vorliegen.

In den Auflockerungszonen kommen mehrere permeable Bereiche vor, die stoßparallel ausgeht sind und senkrecht dazu durch weniger permeable Bereiche voneinander getrennt sind. Das heterogene Auftreten von unterschiedlich permeablen Bereichen bedingt, daß bei der Angabe eines charakteristischen Permeabilitätswertes die Ausdehnung des zu charakterisierenden Gebirgsbereiches berücksichtigt werden muß. Kleinräumig (cm-Bereich) ist die Permeabilität davon abhängig, ob eine stark zerrüttete Zone oder ein kompakter Salzgesteinsbereich betrachtet wird. Dementsprechend groß ist der mögliche Permeabilitätsbereich, und unter Berücksichtigung des ungünstigsten Falles muß die Permeabilität $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ zugeordnet werden.

Ist ein größerer Gebirgsabschnitt zu charakterisieren, kann eine kleinere Permeabilität angegeben werden, wenn extrem große und kleine Durchlässigkeit einander kompensieren. Wesentlich für die Kompensation ist die Fließrichtung relativ zur Ausdehnung der geklüfteten Bereiche. Senkrecht zur Klüfterstreckung bestimmt die Permeabilität der kompakten Gesteinsbereiche die Durchströmbarkeit des Gebirges, parallel zur Klüfterstreckung ist es die Permeabilität der klüftigen Gesteinsbereiche. Aufgrund der Meßergebnisse muß für die Auflockerungszonen um Strecken bis 30 cm Teufe eine Permeabilität $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ unterstellt werden. In Teufen zwischen 30 cm und 50 cm wurden nur ausnahmsweise Durchlässigkeiten über 10^{-16} m^2 gefunden, in den meisten Bohrungen war in diesem Teufenabschnitt die Durchlässigkeit $\leq 10^{-19} \text{ m}^2$. Für Fließbewegungen senkrecht zum Stoß ist daher die Permeabilität 10^{-19} m^2 zugrunde zu legen, für Fließbewegungen parallel zum Stoß 10^{-15} m^2 . In Teufen zwischen 50 cm und 100 cm werden fast durchgehend Permeabilitäten $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt und nur in wenigen Ausnahmen Durchlässigkeiten zwischen 10^{-20} m^2 und 10^{-19} m^2 gefunden. Für den Teufenabschnitt 50 cm bis 100 cm ist deshalb für Fließbewegungen parallel zum Stoß die Permeabilität 10^{-19} m^2 anzusetzen und für Fließbewegungen senkrecht zum Stoß $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$.

Um Abbaukammern wurden in Teufen bis zu 2 m hohe Durchlässigkeiten ermittelt. Für das stoßnahe Gebirge bis 30 cm Teufe wird auch in den Abbaukammern eine Permeabilität von $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ angesetzt.

Schweben und Pfeiler im Zentralbereich

Die Tests zur Untersuchung der Auflockerung im Schweben-/Pfeilersystem ergeben, daß in Schweben stark erhöhte Permeabilitäten bis über 10^{-15} m^2 vorkommen können. In einem Pfeiler auf der 2. Sohle wurde keine erhöhte Permeabilität gefunden. Die Durchlässigkeiten in der Schweben sind nicht gleichmäßig erhöht, sondern es treten wie in der Auflockerungszone um Einzelhöhlräume hochdurchlässige Bereiche im kleinräumigen Wechsel (dm-Bereich) mit geringdurchlässigem Gebirge auf. Schweben zwischen Abbaukammern wird bis zu einer Entfernung von 10 m zur Abbaukammer die Permeabilität $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ zugeordnet, bis 15 m Entfernung zur Abbaukammer $\geq 10^{-19} \text{ m}^2$ (s. Abbildung 53). Pfeilern braucht neben der Auflockerung, die sich um Einzelhöhlräume bildet, keine weitere Permeabilitätssteigerung zugewiesen werden.

Grenze Steinsalz/Anhydrit

An der Grenze Steinsalz/Anhydrit ist die Durchlässigkeit im Steinsalz nicht erhöht. Auch für den Anhydrit ist die Grenze Steinsalz/Anhydrit nicht permeabilitätswirksam. Klüfte im Anhydrit, die bis an die Grenze heranreichen, sind durch hineingekrochene Salz verschlossen.

4.2.1.2 Gesteinsart

Salzton

Schichten aus Tonstein und Magnesit wurden in zwei Tests untersucht. In einem Test mit Gas als Testfluid wurden sie in einem stark abbaubeeinflussten Zustand angetroffen, der sich aus der geringen Entfernung des Testintervalls zum Stoß und der Lage am Rand der intensiv durchörterten Hauptmulde ergibt. Die festgestellte Permeabilität ist kleiner als 10^{-20} m^2 . Daraus ergibt sich, daß dem Tonstein unabhängig von der mechanischen Beanspruchung eine Permeabilität für Gas kleiner als 10^{-20} m^2 zuzuordnen ist. In einem Test mit Salzlösung wurde an einer mechanisch wenig beanspruchten Lokation eine Permeabilität von $5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ ermittelt. Beim Kontakt mit Wasser zerfällt das Gestein. Daher besitzt Salzton keine hydraulische Dichtwirkung, wenn bei

entsprechendem Raumangebot das Gestein seine Festigkeit im Kontakt mit Lösung verliert und durch vorbeiströmende Lösungen weggeschwemmt werden kann.

Anhydrit

Die Permeabilität des Anhydrits ist in kompakten Gebirgsbereichen gleich der Matrixpermeabilität $k \leq 10^{-20} \text{ m}^2$. In geklüfteten Bereichen treten höhere Permeabilitäten bis $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ auf. Der am Kernmaterial erkennbare Porenraum, der in offenen und teilverheilten Klüften vorkommt, ist nicht als abbau- bzw. entspannungsbedingt einzustufen. Die Abstände zwischen zwei Klüftzonen können mehrere Meter betragen. Daher ist der Anhydrit bis in den 10 m-Bereich als heterogen anzusehen und für die Permeabilität ein Wert von $k \geq 10^{-15} \text{ m}^2$ anzusetzen.

Zur näheren Beschreibung der Klüftigkeit des Anhydrits wurde eine ingenieurgeologische Klüftanalyse vorgenommen. Dabei wurden über 15.000 Klüfte, die von DBE in Anhydrit-Aufschlüssen im ERAM kartiert wurden, sowie von BGR an Kernen festgestellte Risse und Klüfte berücksichtigt. Die Risse und Klüfte wurden nach Schollen geordnet in Polpunktdiagrammen dargestellt. Die anscheinend gleichmäßige Verteilung der Polpunkte geht in ein orthogonales System über, wenn Risse und Klüfte mit großer Ausdehnung ($> 0,5 \text{ m}$) stärker gewichtet werden. Dieses orthogonale Klüftnetzwerk ist parallel zur Faltenachse der Salzstruktur ausgerichtet. Hydraulisch leitfähig erscheint nur jeweils eine Kluft auf mehreren Metern Aufschlußlänge. Die Längserstreckung der meisten Klüfte ist gering. Von den in Streckenaufschlüssen kartierten Klüften wurden nur ca. 3 % als „in situ offen“ eingestuft, und weniger als 1 % der Klüfte hat eine Ausdehnung von mehr als 4 m. Danach ist eine großräumige Vernetzung permeabler Bereiche innerhalb einer Anhydritscholle unwahrscheinlich.

Durch Tests konnte die Begrenztheit eines in einer Anhydritscholle angelegten Wegsamkeitsnetzes bisher nicht nachgewiesen werden.

Rückschlüsse über das Volumen von Wegsamkeitsnetzen in Anhydritschollen lassen sich aus den vereinzelt beobachteten Fluidzutritten ziehen. Beim Teufen der Bohrung RB 506 traten ca. 1.300 m^3 Gas aus dem Hauptanhydrit zu. Unter petrostatischen Bedingungen bei 400 m überlagernder Gesteinsmächtigkeit nimmt diese Gasmenge ein Volumen von ca. 10 m^3 ein. Das von der Bohrung RB 506 aufgeschlossene Wegsamkeitsnetz würde danach ein Hohlraumvolumen von mindestens 10 m^3 besitzen. Nimmt man als initialen Fluiddruck im Wegsamkeitsnetz nicht den petrostatischen Teufendruck an, sondern den Druck, der beim Anbohren des Wegsamkeitsnetzes am Bohrlochkopf gemessen wurde ($0,35 \text{ MPa}$), dann ergibt sich ein zusammenhängendes Hohlraumvolumen von ca. 370 m^3 .

Rückschlüsse über den Vernetzungsgrad der Wegsamkeiten innerhalb einer Anhydritscholle lassen sich aus dem Lösungszutritt im Abbau 1a auf der 1. Sohle und dem Vergleich mit Literaturangaben zur Porosität von Anhydrit ziehen. Im Abbau 1a auf der 1. Sohle sind innerhalb von 25 Jahren insgesamt 120 m^3 Lösung zugetreten. Die Speisung dieses Zutritts erfolgt aus der über dem Abbau liegenden Anhydritscholle. Dort ist folglich ein Wegsamkeitsnetz mit einem zusammenhängenden Hohlraumvolumen von mindestens 120 m^3 vorhanden. Das Volumen der Anhydritscholle beträgt ca. $10^4 - 10^5 \text{ m}^3$. Das Verhältnis von vernetztem Hohlraumvolumen, aus dem der Zutritt gespeist wird, zum Gesamtvolumen der Scholle beträgt damit $0,1 - 1 \%$. Die Porosität von Anhydrit beträgt Literaturangaben zufolge (BÖHRINGER et al. (1990), JEWENTOW et al. (1973), THORDARSON (1989), ZIMMER & YARAMANCI (1994)) regelmäßig unter 1 %. Das bedeutet, daß der vernetzte Porenraum in der Anhydritscholle über Abbau 1a gleich dem gesamten Porenvolumen der Anhydritscholle ist, bzw. gleichbedeutend, daß die Wegsamkeiten innerhalb der Anhydritscholle vollständig vernetzt sind.

Die zusammenfassende Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften des Anhydrits lautet daher wie folgt:

Der Anhydrit ist makroskopisch heterogen. Seine Permeabilität ist in kompakten Gebirgsbereichen $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$. In geklüfteten Bereichen treten Permeabilitäten bis $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ auf. Es muß unterstellt werden, daß Wegsamkeiten im Anhydrit großräumig vernetzt sind.

4.2.2 Vergleich mit Labormessungen an Kernproben

Permeabilitäts- und Porositätsmessungen im Labor wurden an 13 Kernproben durchgeführt. Die Kernproben mit 50 mm Durchmesser und 100 mm Länge wurden aus den an den Testlokalationen erbohrten Kernen durch Abdrehen herauspräpariert.

In den Labormessungen zur Bestimmung der Permeabilität, die als stationäre Durchströmungsexperimente ausgeführt wurden, waren die Kernproben allseitig gleich mit Umschließungsdrücken zwischen 1 und 3 MPa belastet. Als strömendes Medium wurde Stickstoff verwendet, der mit Drücken zwischen 0,2 und 0,3 MPa injiziert wurde und gegen Atmosphärendruck ausströmte.

Aus den Bohrungen RB 525, 526 und 527 wurden drei Anhydritproben und drei Steinsalzproben, die aus der Nähe des Übergangs Steinsalz/Anhydrit stammen, untersucht. Übereinstimmend mit den Ergebnissen der in-situ-Tests konnte für alle Proben nachgewiesen werden, daß keine Durchlässigkeit $\geq 10^{-20} \text{ m}^2$ vorhanden ist.

Aus der Bohrung RB 522 wurden drei Anhydrit-Kernproben aus Teufen zwischen 4,8 und 5,6 m untersucht. Für diesen Teufenbereich hatten die in-situ-Test $k \leq 10^{-20} \text{ m}^2$ ergeben. Die Labormessungen bestätigen dieses Ergebnis für eine Kernprobe, die beiden anderen Proben wiesen in Abhängigkeit vom eingestellten Belastungszustand Durchlässigkeiten von 1 bis $2 \cdot 10^{-19}$ bzw. 3 bis $9 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ auf. Da in den Bohrlochtests die mittleren Permeabilitäten im 1,5 m langen Intervall ermittelt werden, stehen kleinräumig erhöhte Durchlässigkeiten nicht im Widerspruch zu einem in-situ-Test mit dem Resultat $k \leq 10^{-20} \text{ m}^2$, zumal auch die Bohrlochtests in RB 522 die Heterogenität des Anhydrits bezüglich seiner Durchlässigkeit ergeben hatten. Allerdings kann auch die Möglichkeit einer Kernschädigung durch den Bohrvorgang nicht ausgeschlossen werden.

Aus der Bohrung RB 541 wurden drei Kernproben untersucht. Eine Anhydritprobe aus der Teufe 3,4 - 3,5 m hatte eine Permeabilität unter 10^{-20} m^2 . Für eine Probe aus der Teufe 3,5 - 3,6 m, die Anhydrit und Steinsalz enthielt, wurde belastungsabhängig 1 bis $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt. Eine Steinsalzprobe aus 4,2 - 4,3 m Teufe hatte eine belastungsabhängige Permeabilität von 0,5 bis $1,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Diese Meßergebnisse deuten darauf hin, daß der durch den in-situ-Test für die Teufe $> 5 \text{ m}$ nachgewiesene dichte Gebirgsbereich im Nahbereich um die Abbaukammer in einen Bereich mit höheren und dabei wechselnden Permeabilitäten übergeht. Dabei ist der Bereich erhöhter Permeabilität in der Bohrung RB 541 mit unter 5 m nur etwa halb so mächtig wie in der Bohrung RB 542.

Die Labormessungen zeigen, daß das Herauslösen der Proben aus dem Gebirgsverband und die damit verbundene Entlastung nicht zur Bildung von Wegsamkeiten führt (vorausgesetzt, daß nicht beim Bohren durch die Vibrationen oder die zum Zerspanen in das Gebirge eingeleiteten Kräfte eine Schädigung des Kernes verursacht wird). Die Entlastung von Gebirgsbereichen durch die Anlage untertägiger Grubenbaue ist daher nicht permeabilitätswirksam, solange das Gebirge nicht dilatant verformt ist.

Zur Porositätsbestimmung wurden Überströmversuche bei allseitigen Umschließungsdrücken von 1 MPa durchgeführt. In einem Überströmversuch wird eine Gesteinsprobe mit bekanntem Volumen in einem gasdichten Probenbehälter plaziert. An diesen angeschlossen ist über eine verschleißbare Leitung ein zweiter Behälter. Zunächst ist die Leitung verschlossen und in bei-

den Behältern werden unterschiedliche Anfangsdrücke eingestellt. Nach dem Öffnen der Leitung kommt es zum Druckausgleich. Aus den Drücken vor und nach dem Druckausgleich sowie den Volumina der Behälter und der Probe ergibt sich gemäß dem Boyle-Mariotte-Gesetz das Porenvolumen und damit die Porosität. Die Porosität aller durchströmbaren Kernproben war kleiner als 0,5%.

4.2.3 Vergleich mit Literaturangaben

In den durchgeführten Tests wurde festgestellt, daß Steinsalz im unverritzten Zustand keine Durchlässigkeit $\geq 10^{-20} \text{ m}^2$ besitzt. Dieses Resultat steht im Einklang mit Literaturangaben, z.B. von DREYER (1982), HOFRICHTER (1976), PEACH (1991), ROEDDER (1984), STORMONT & DEAMEN (1992), STERRET & NELSON (1985).

Für aufgelockerte Bereiche um untertägige Grubenbaue werden in der Literatur Permeabilitätswerte in einer großen Bandbreite bis $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ angegeben. Dabei deuten die veröffentlichten Meßergebnisse von STORMONT, HOWARD & DEAMEN (1991) und von MIEHE et. al (1993) auf einen kontinuierlichen Abfall der Permeabilität mit zunehmender Entfernung vom Stoß hin. Demgegenüber zeigen die im ERAM durchgeführten Tests, daß die Permeabilität im Gebirge um einen Hohlraum nicht monoton verläuft. Anstatt einer gleichmäßigen Abnahme der Permeabilität mit wachsender Entfernung vom Stoß eines Grubenbaus bilden sich diskrete Wegsamkeiten, die mit wachsender Entfernung vom Stoß seltener vorkommen. Diese Feststellung steht in Übereinstimmung mit der Erfahrung, daß bei Stoßabschalungen größere kompakte Gesteinskörper hereinbrechen und nicht eine gleichmäßige Auflösung des Gesteinsverbands auftritt. Die im ERAM ermittelten Permeabilitäten für Auflockerungszonen stimmen mit den in der Literatur genannten Werten überein.

Zur Durchlässigkeit von Salzton werden in der Literatur wenige Angaben gemacht. Untersuchungen von FÖRSTER (1974) zeigen die bereichsweise gegebene Undurchlässigkeit von Salzton. Die bereichsweise vorliegende Durchlässigkeit von Salzton wird durch die von STOLLE (1954) zitierten Kohlenwasserstoff-Zutritte belegt. Zahlenwerte werden nur von ZIMMER & YARAMANCI (1994) genannt, danach ist die Permeabilität von Salzton im Bereich $10^{-17} - 10^{-18} \text{ m}^2$ einzuordnen. Die im ERAM ermittelten Permeabilitäten für Salzton werden daher durch Literaturangaben bestätigt.

Als repräsentative Werte für die Permeabilität von Anhydrit im unverritzten In-situ-Zustand werden von LOMENICK & KANEHIRO (1988) $10^{-18} - 10^{-19} \text{ m}^2$ genannt. Die von ihnen zitierten In-situ-Tests in der WIPP-Site führen auf die Größenordnung $10^{-18} - 10^{-20} \text{ m}^2$. THORDARSON (1989) gibt an, daß die Porosität von Anhydrit ca. 1 % beträgt und die Permeabilität abhängig von der Anzahl vorhandener Risse schwankt. SMITH (1990) führt die Bildung von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten unter Anhydritlagen als Beleg für die bereichsweise gegebene Dichtigkeit von Anhydrit an. Laboruntersuchungen an Anhydritproben von ZIMMER & YARAMANCI (1994) führten auf Permeabilitätswerte um 10^{-19} m^2 . Von BÖHRINGER et al. (1990) werden Ergebnisse aus In-situ-Tests im Anhydrit zitiert, in denen Werte zwischen $\leq 10^{-20}$ und 10^{-14} m^2 ermittelt wurden. Die Literaturangaben bestätigen damit, daß der Anhydrit, wie im ERAM ermittelt, hinsichtlich seiner Permeabilität heterogen ist.

4.3 Räumliche Extrapolation der Meßergebnisse

In Abbildung 86 ist ein Vertikalschnitt durch den Zentralteil (Blickrichtung Nord) dargestellt. Der Schnitt ist wenige Meter nördlich des Ostquerschlages angelegt. Die im dargestellten Be-

reich vorhandenen Bohrungen für Permeabilitätsmessungen sind eingezeichnet. An diesem Schnitt wurden gebirgsmechanische Modellrechnungen durchgeführt. Diejenigen Bereiche, für die im Steinsalz dilatante Verformungen berechnet wurden, sind in dem Schnitt dunkel eingefärbt. Mittelgrau dargestellt ist Anhydrit. Die lange Bildkante entspricht einer Länge von ca. 200 m.

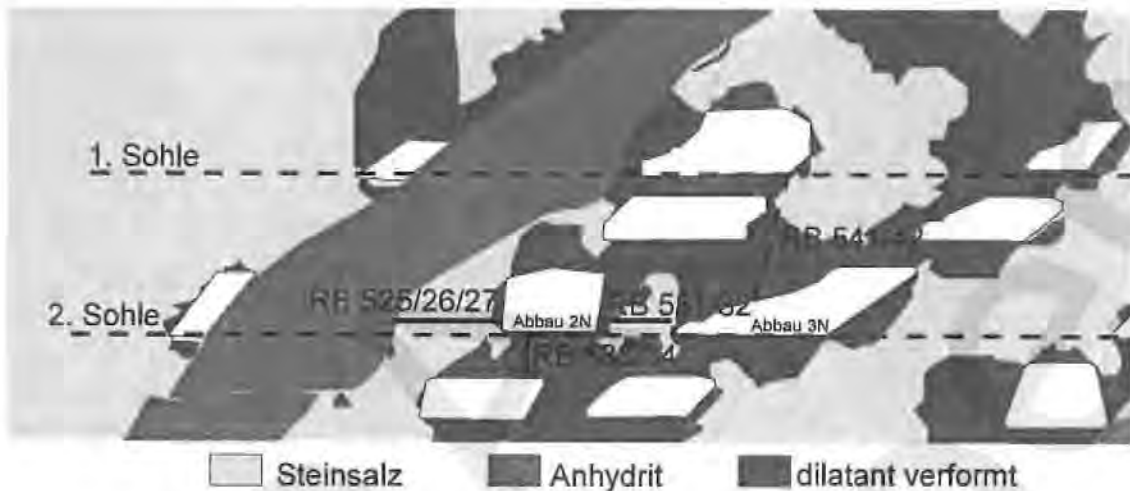


Abbildung 86: Projektion der Testbohrungen in einen charakteristischen Schnitt durch den Zentralteil

Die Bohrungen RB 525, 526 und 527 sowie RB 533 und 534 befinden sich wie in der Abbildung dargestellt in der Schnittebene bzw. in einigen Metern Entfernung nach Norden. Die in den Schnitt projizierten Bohrungen RB 531 und 532 befinden sich zwischen den an die geschnittenen Abbaue nach Norden angrenzenden Abbauen. Die Bohrungen RB 541 und 542 sind gestrichelt in den Schnitt eingezeichnet. Ihre Ansatzpunkte auf der 2. Sohle befinden sich am nördlichen Rand des im Schnitt dargestellten Abbaus. Dort ist die Einbauchung des westlichen Stoßes bzw. der Firste in den Abbau hinein weniger stark ausgeprägt als im südlichen Bereich, durch den der Schnitt verläuft. Die Bohrung RB 541 verläuft nicht parallel zur Schnittebene, sondern ist nach Norden geneigt.

Wie Abbildung 86 zeigt, verlaufen die Bohrungen in dilatant verformten Gebirgsbereichen und in Bereichen, die nicht dilatant verformt sind. Die Testergebnisse korrelieren gut mit den berechneten mechanischen Beanspruchungen. Im Bereich der Bohrungen RB 525, 526 und 527 wurden keine erhöhten Permeabilitäten gefunden. Für diesen Gebirgsbereich ergeben auch die gebirgsmechanischen Modellrechnungen, daß trotz der Grenze Steinsalz/Anhydrit in der Nachbarschaft zu einer großen Abbaukammer keine dilatante Gesteinsverformung aufgetreten ist. Die FE-Rechnungen weisen für die Schweben generell dilatante Verformungen aus, während der Pfeiler zwischen den Abbauen 2N und 3N auf der 2. Sohle nicht dilatant verformt ist. Auch in den hydraulischen Tests wurden sehr starke Auflockerungen in der Schweben zwischen 2. Sohle und 3a Sohle mit Permeabilitäten bis über 10^{-15} m^2 festgestellt (Bohrungen RB 533 und 534). Der Pfeiler zwischen den Abbauen 2N und 3N auf der 2. Sohle wies in mehr als 1 m Abstand vom Stoß keine erhöhten Permeabilitäten auf (Bohrungen RB 531 und 532). Die Bohrungen RB 541 und 542 verlaufen in einem Gebirgsbereich, der nicht eindeutig als Schweben oder als Pfeiler zu charakterisieren ist. Für diesen Bereich oberhalb des Abbau 3N auf der 2. Sohle treten den gebirgsmechanischen Modellrechnungen zufolge sowohl dilatant wie nicht dilatant verformte Bereiche auf. In den hydraulischen Tests werden nur in einer der Bohrungen erhöhte Durchlässigkeiten ermittelt. Deren Auftreten ist auf einen Bereich bis ca. 15 m Entfernung von der 2. Sohle beschränkt.

Aus der guten Übereinstimmung der Testergebnisse mit den Ergebnissen gebirgsmechanischer Modellrechnungen folgt, daß die hydraulische Charakterisierung von Gebirgsbereichen aufgrund von gebirgsmechanischen Modellrechnungen zulässig ist. Wesentlich ist dabei die Erkenntnis, daß eine Permeabilitätserrhöhung im Steinsalz nur dann auftritt, wenn das Gebirge dilatant verformt ist, und nicht schon dann, wenn das Gebirge gegenüber dem unverritzten Zustand ohne Überschreitung der Dilatanzgrenze entlastet ist (siehe auch Abschnitt 4.2.2). Daher ist es für die hydraulische Charakterisierung ausreichend, dilatant verformte Gebirgsbereiche in den gebirgsmechanischen Modellrechnungen auszuweisen.

Gebirgsmechanische Modellrechnungen wurden an charakteristischen Schnitten für das Südfeld, das Westfeld und das Ostfeld vorgenommen. Auf der Grundlage dieser Rechnungen wird die hydraulische Charakterisierung des Grubengebäudes vorgenommen. Dazu werden in den Berechnungsquerschnitten die Bereiche unterschiedlicher Permeabilitäten gesondert ausgewiesen. Mit Bereich 1 wird unverritztes Salzgestein bezeichnet, das keine Permeabilitäten größer 10^{-20} m^2 besitzt. Bereich 2 sind Anhydritschollen, in denen Permeabilitäten zwischen $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ und $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ auftreten können. Im dilatant verformten Gebirge, Bereich 3, betragen die Permeabilitäten bis $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$. Salztönschichten werden nicht gesondert ausgewiesen, da sie mit relevanten Ausdehnungen (oberhalb dm-Bereich) nur zusammen mit Anhydrit vorkommen und daher nicht bestimmend für die hydraulische Leitfähigkeit eines Gebirgsbereiches sind.

Die entsprechend markierten Schnitte durch das Südfeld und Westfeld sind in der folgenden Abbildung 87 und Abbildung 88 dargestellt.

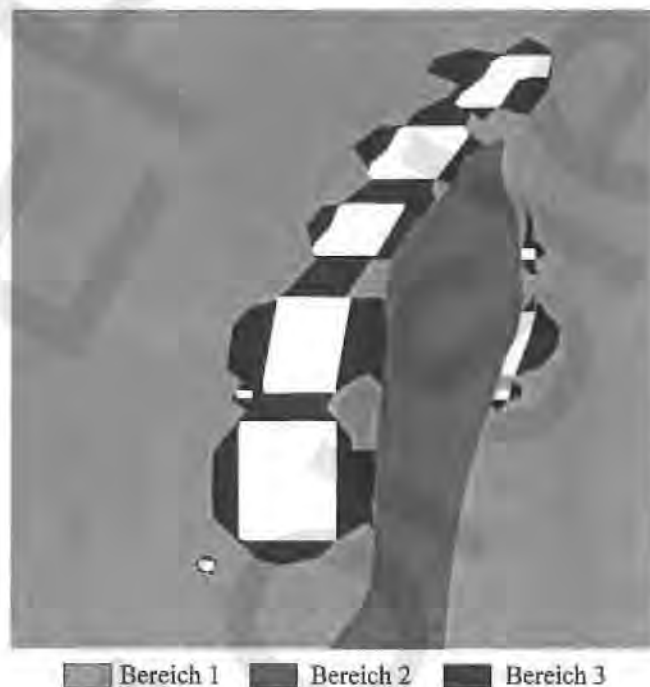


Abbildung 87: Permeabilitätsverhältnisse im Südfeld

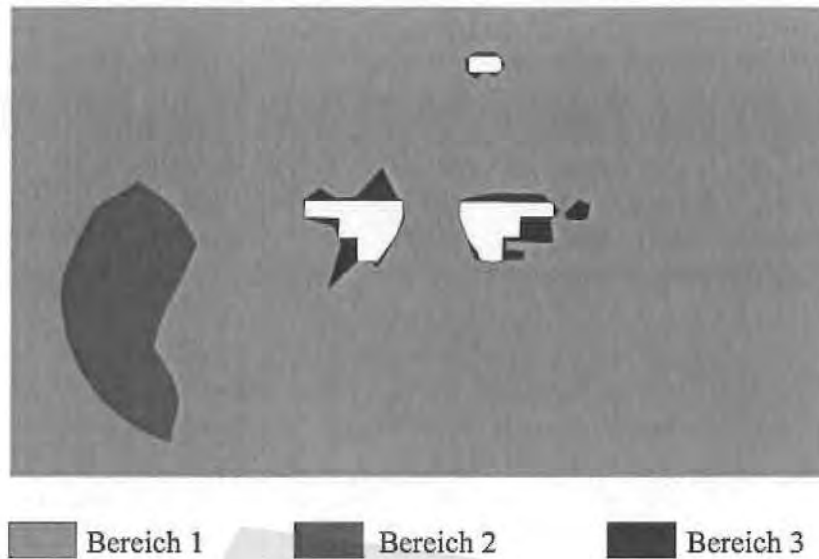


Abbildung 88: Permeabilitätsverhältnisse im Westfeld

Für das Ostfeld wurden gebirgsmechanische Modellrechnungen an zwei Schnitten durchgeführt. Die darauf basierende Permeabilitätseinteilung ist in Abbildung 89 und Abbildung 90 dargestellt.

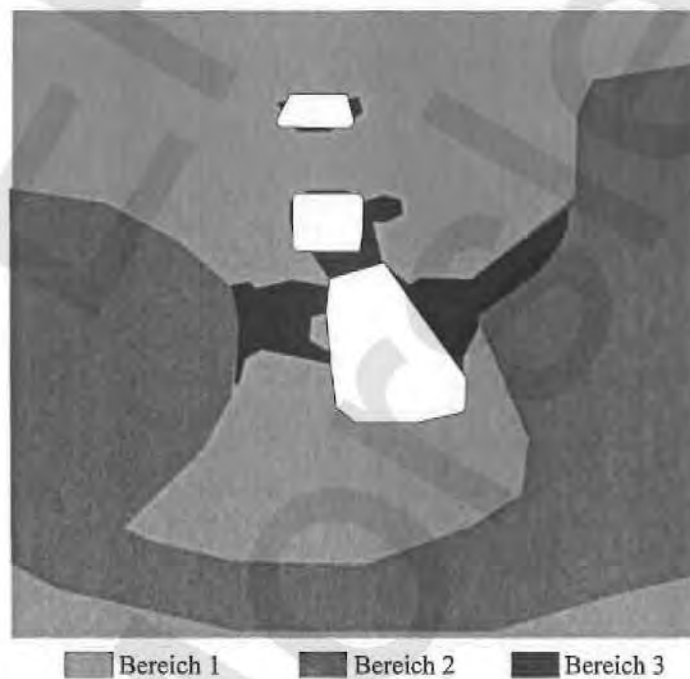


Abbildung 89: Permeabilitätsverhältnisse im Ostfeld, Schnitt 1

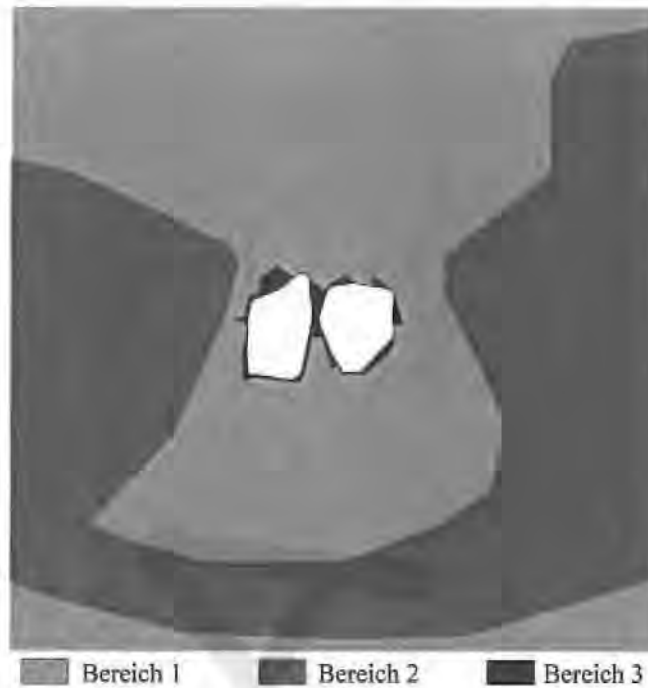


Abbildung 90: Permeabilitätsverhältnisse im Ostfeld, Schnitt 2

Die Ausdehnung der Bereiche mit erhöhter Permeabilität infolge dilatanter Gesteinsverformung beträgt relativ zum Hohlraum in den einzelnen Schnitten ca. 40 % im Westfeld, ca. 50 % im Ostfeld und ca. 110 % im Südfeld.

5 Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Permeabilitäten der Salzgesteine im Grubengebäude Morsleben wurden Pulstests und Constant Rate Tests unter Verwendung von Preßluft oder Salzlösung als Testfluid durchgeführt. Unterschiede in den Permeabilitätswerten haben außerhalb des Wertebereichs 10^{-15} m^2 bis 10^{-20} m^2 keine oder nur vernachlässigbare Unterschiede in der Barrierewirkung des Gesteins zur Folge. Deshalb werden Permeabilitäten außerhalb dieses Wertebereichs pauschal mit $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ oder $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ angegeben.

Die Tests weisen nach, daß Steinsalz im unverritzten Zustand keine Durchlässigkeit größer als 10^{-20} m^2 besitzt. Dieses Resultat wird sowohl mit Gas als auch mit Salzlösung als Strömungsmedium erzielt. Die Auflockerungszone um Strecken (Querschnittsfläche $\approx 10 \text{ m}^2$) ist weniger als 1 m mächtig. Im stoßnahen Bereich (bis 20 cm) werden Permeabilitäten bis 10^{-15} m^2 gemessen. Die Ausdehnung der Auflockerungszonen um große Abbaukammern (Querschnittsfläche = $10^2 - 10^3 \text{ m}^2$) ist auf wenige Meter beschränkt. Die Auflockerungszone kann größer sein, wenn zusätzliche mechanische Beanspruchungen aufgrund der Nähe zu anderen großen Abbaukammern oder zur Grenze von Gesteinen mit unterschiedlichen Festigkeiten vorliegen. Intensiv durchhörte Gebirgsbereiche weisen hohe Durchlässigkeiten vor allem in Schweben zwischen Abbauen auf.

Salzton besitzt für Gas keine Durchlässigkeit größer als 10^{-20} m^2 , ist jedoch für Salzlösung durchströmbar mit einer Permeabilität im Bereich 10^{-18} bis 10^{-19} m^2 .

Der Anhydrit ist heterogen und weist wechselnde Permeabilitäten von $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ bis in den Bereich $\geq 10^{-15} \text{ m}^2$ auf. Diese Permeabilitätsvariation tritt im Meterbereich auf. Kompakter An-

hydrit besitzt für Gas und Salzlösung keine Durchlässigkeit größer als 10^{-20} m^2 . Nur in geklüfteten Bereichen liegen höhere Permeabilitäten vor. Es muß unterstellt werden, daß Wegsamkeiten im Anhydrit großräumig vernetzt sind. Die Klüfte im Anhydrit sind am Übergang Steinsalz/Anhydrit durch Hineinkriechen des Salzes verschlossen.

Die Testergebnisse werden durch Labormessungen an Kernproben und durch Vergleiche mit Literaturangaben bestätigt.

Aus Vergleichen der Testergebnisse mit Rechenergebnissen zur Gebirgsmechanik folgt, daß eine Permeabilitätserhöhung im Steinsalz nur dann auftritt, wenn das Gebirge dilatant verformt ist, und nicht schon dann, wenn das Gebirge gegenüber dem unverritzten Zustand ohne Überschreitung der Dilatanzgrenze entlastet ist.

Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse zur Geologie und der Ergebnisse aus gebirgsmechanischen Modellrechnungen wurden charakteristische Schnitte durch das Südfeld, das Ostfeld und das Westfeld in Permeabilitätsbereiche eingeteilt. Im Westfeld bildet sich eine Auflockerungszone, deren Volumen das 0,4-fache des Volumens der dort vorhandenen Abbaue beträgt. Die aufgelockerten Gebirgsbereiche sind im Westfeld auf Steinsalz- und Kalisalzschichten beschränkt. Im Ostfeld beträgt das Verhältnis des aufgelockerten Gebirgsvolumens zum dort vorhandenen Abbauvolumen ca. 0,5 und im Südfeld ca. 1,1. Im Ostfeld und Südfeld werden neben Salzschichten auch Anhydritbereiche von dilatanten Verformungen erfaßt.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE

6 Literaturverzeichnis

- AL-HUSSAINY, R. & RAMEY, H.J. JR. (1966): Application of Real Gas Flow Theory to Well Testing and Deliverability Forecasting. *J. Pet. Tech.* May 1966, 637 - 642
- BÖHRINGER, J., JENNI, J.P., HÜRLIMANN, W., RESELE, G., GRAUER, R. & NORBERT, J. (1990): Anhydritvorkommen als Wirtgestein für die Lagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle dargestellt am Beispiel des Bois de la Glaive: Statusbericht. Nagra Technischer Bericht 88-15, Baden/Schweiz
- BREDEHOEFT, J.D & PAPADOPULOS, I.S. (1980): A Method for Determining the Hydraulic Properties of Tight Formations. *Water Resour. Res.*, 1 (16), 233 - 228
- COOPER, H.H, BREDEHOEFT, J.D. & PAPADOPULOS, I.S. (1967): Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water. *Water Resour. Res.*, 3 (1), 263 - 269
- DREYER, W. (1982): *Underground Storage of Oil and Gas in Salt Deposits and Other Non-Hard Rocks.* Ferdinand Enke Publishers, Stuttgart
- FÖRSTER, S. (1974): Durchlässigkeits- und Rißbildungsuntersuchungen zum Nachweis der Dichtigkeit von Salzkavernen. *Neue Bergbautechnik* 4, Nr. 4, 278 - 283
- HOFRIEGER, E. (1976): Zur Frage der Porosität und Permeabilität von Salzgesteinen. *Erdöl-Erdgas-Zeitschrift* 92, 77 - 80
- LOMENICK, T.F. & KANEHIRO, B.Y. (1988): Hydrological Evaluation of five Sedimentary Rocks for High-Level Waste Disposal. In: H.C. Burkholder: *High-Level Nuclear Waste Disposal.* Batelle Press, Richland
- MIEHE, R., HARBORTH, B., KLARR, K. & OSTROWSKI, L. (1993): Permeabilitätsbestimmungen im Staßfurt-Steinsalz in Abhängigkeit von einer Streckenauffahrung. *Kali und Steinsalz*, 11, 5/6, 175 - 184
- PEACH, C.J. (1991): Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. Dissertation TU Utrecht
- ROEDDER, E. (1984): The Fluids in Salt. *American Mineralogist* 69, 413 - 439
- SMITH, L. (1990): Geologic Controls on Porosity and Permeability Variation in Silurian Pinnacle Reef Bioherms, Southwestern Ontario. Ontario Petroleum Institute Inc. 29. Annual Conference 14. - 16. November 1990, 1 - 19
- STERRET, R.J. & NELSON, R.A. (1985): Impact of Borehole Deformation on Hydrogeologic Testing in Salt. *Int. Association of Hydrogeologists, Proceedings, Hydrogeology of Rocks of Low Permeability, Memoires Vol. 17 Part 1*
- STOLLE, E. (1954): Gasvorkommen in Kaliwerken des Südharzgebietes. *Bergbautechnik* 4, 1, 46 - 52
- 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, Sandia National Laboratories, Albuquerque
- STORMONT, J.C. & DAEMON, J.J. (1992): Laboratory Study of Gas Permeability Changes in Rock Salt during Deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 29, 4, 325 - 342
- THORDARSON, W. (1989): Hydrogeology of Anhydrite. In: Dean, W.E., K.S. Johnson: *Anhydrite Deposits of the United States and Characteristics of Anhydrite Important for Storage of Radioactive Wastes.* U.S. Geological Survey Bulletin 1794, 95 - 105
- ZIMMER, U. & YARAMANCI, U. (1994): Untersuchungen von Anhydritgesteinen und Salztönen in bezug auf die Sicherheit eines Endlagers für radioaktiven Abfall. *Kali und Steinsalz* 12, 8/9, 292 - 296